HAWK
Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst
Fachhochschule Hildesheim / Holzminden / Göttingen
Fachbereich Konservierung und Restaurierung
Studienrichtung Steinobjekte

Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung sulfatreduzierender Bakterien auf Sandsteinoberflächen mit Gipskrusten

Diplomarbeit WS 2005 / 2006
Konservierung / Restaurierung von Steinobjekten, Mikrobiologie
bei Prof. Dr. Karin Petersen
und Prof. Jan Schubert
Hildesheim Januar 2006

vorgelegt von:
Malaika Scheer
Ludolfinger Straße 30
31137 Hildesheim
Matr.-Nr. 34 99 78

Malaika Scheer
Ludolfinger Straße 30
31137 Hildesheim
Tel. 05121 206094
Matr.-Nr. 349978

Hiermit erkläre ich, Malaika Scheer, dass die vorliegende Diplomarbeit im Fach Konservierung / Restaurierung von Steinobjekten mit dem Thema

„Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung sulfatreduzierender Bakterien auf Sandsteinoberflächen mit Gipskrusten“

eigenständig von mir erstellt wurde.

Hildesheim, den 02.01. 2006

Abstract

The thesis paper at hand deals with the elimination of gypsum crusts on sandstone surfaces by the use of sulphate reducing bacteria. Within the project, the required quantity of two bacteria's breeds was successfully grown. Miscellaneous pre-experiments could improve the basic conditions decisively. Different techniques of application, both the use of synthetic foils and the use of Carbopol gel were tested and evaluated as adequate for the practice of sulphate reducing bacteria on stone surfaces. The biological compresses were applied on different sandstone surfaces: Saxonian sanstones from Dresden, red sandstone from Książ castle in Poland and sandstone from Hildesheim cathedral. The test results showed a quantitative reduction of salts and a slight optical success.
Summarizing the results, the use of sulphate reducing bacteria is possible for any restorer with the equipment available at HAWK. However, the bacteria may survive several days when in contact with air oxygen. Because of this, complete control of the process is not given.
Concerning both structural salt reduction and aesthetic issues, the method tested is comparable to the classic “AMC compress”. Because of the high financial expenses and expenditure of time, the method cannot be recommended whatsoever.

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Entfernung von Gipskrusten auf Sandsteinoberflächen durch sulfatreduzierende Bakterien. Zwei verschiedene Bakterienstämme konnten im Rahmen der Arbeit erfolgreich in den nötigen Größenordnungen angezüchtet werden. Durch mehrere Vorversuche konnten die Rahmenbedingungen entscheidend verbessert werden. Es wurden außerdem Applikationstechniken - der Gebrauch von Kunststofffolien sowie die Verwendung von Carbopol- Gel - überprüft und als geeignet für die Anwendung sulfatreduzierender Bakterien an Steinoberflächen bewertet. Die Biokompressen wurden auf unterschiedlichen Sandsteinoberflächen, sächsischen Sandsteinen aus Dresden, rotem Sandstein an Schloss Książ in Polen und Sandstein am Hildesheimer Dom appliziert. Dabei konnte in den Untersuchungen eine quantitative Salzreduzierung und auch ein leichter optischer Erfolg verzeichnet werden.
Im Ergebnis ist der Einsatz von sulfatreduzierenden Bakterien für den Restaurator mit dem Equipment, das an der HAWK zur Verfügung steht, durchführbar. Die Bakterien können über mehrere Tage am Luftsauerstoff überleben. Damit ist eine Begrenzung des Einsatzes nicht gegeben.
Das Ergebnis erscheint sowohl aus der Sicht der strukturellen Salzverminderung als auch unter ästhetischen Gesichtspunkten mit der klassischen „AMC- Kompresse“ vergleichbar. Auf Grund der großen Zeit- und Kostenfaktoren kann die Durchführung jedoch nicht uneingeschränkt empfohlen werden.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 1
1. Vorüberlegungen 1
2. Vorgeschichte 2
3. Stand der Forschung 3
4. Zielstellung 4
5. Aufbau der Arbeit 4

1.Teil

I. Verwitterung von Naturstein durch Gipsbelastung 5
1. allgemein 5
2. Verwitterung 5
1. physikalische Verwitterung 7
2. chemische Verwitterung 7
3. biologische Verwitterung 8
3. Salzbelastung als Hauptursache für Gesteinsschäden . . . 9
4. Gips 10
5. Ursachen für die Entstehung von Gipskrusten 11
1. Schwefel / Sulfate 12
2. Calcium 13
6. Auftreten und Aussehen 14
7. Verwitterung von Sandstein 16
1. Sandstein 16
2. Verwitterung von Sandsteinen 17
3. Beispiele 19
8. Zusammenfassung 20

II. Klassische Reinigungs- und Salzreduzierungsmethoden . . . 21
1. Überblick 21
2. Methoden 21
1. Reinigungsziele 21
2. Reinigungsmethoden 21
a. trockene mechanische Verfahren 22
b. nasse Reinigungsverfahren 22
c. chemische Reinigungsverfahren 22

3. Behandlung bauschädlicher Salze 23
1. trockene mechanische Verfahren 23
2. chemische Salzumwandlung 23
3. physikalische Salzreduzierung 24
a. Entsalzen mit Kompressen 24
b. Sanierputze und Opferputze 24
c. Entsalzung im Wasserbad 25
d. Entsalzung durch Elektromigration 25
e. Einstellung von Klimakonstanten 26
f. Mikrowellen 26
4. Restaurierungspraxis 26
5. Zusammenfassung des 1- Teils 27

2. Teil

I. Vorbereitung des Hauptversuchs 29
1. Einleitung 29
2. Problemstellung mikrobielle Salzumwandlung. 29
3. Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung des Versuchs . 30
1. Medienherstellung 31
2. Vorbereiten der Anaerobenkammer 32
3. Aktivierung der Bakterien 33
a. Sulfatreduzierende Bakterien allgemein 33
b. Geschichte und Vorkommen der Sulfatreduzierer . . 34
c. Desulfovibrio- Arten 35
d. Durchführung 36
4. Überprüfen der Lebensfähigkeit / Vitalität 37
5. Ergebnis 39
4. Überprüfung der Reinheit der Kulturen 40
1. Vorbereitung 40
2. Unterscheidung gram- positiver und gram- negativer Bakterien . . 41
3. Gram- Färbung 41
4. b. KOH- Test 43
5. Ergebnis 43
5. Zusammenfassung 44

II. Anreicherung und Massenkultivierung der Bakterien 45
1. Vorüberlegungen 45
2. Zentrifugation 46
1. Durchführung 46
2. Untersuchungen zur Bakterienanzahl 47
3. Thomakammer 48
4. Berücksichtigung der „log“- Phase 49
5. Ergebnis 50
3. Filtration 52
1. Durchführung 52
2. Ergebnis 55
4. Zusammenfassung 55

III. Verdünnen des Nährmediums und Überprüfung der Bakterientätigkeit . 56
1.Hälterung der Bakterien 56
2. Bewertung der Gipswürfeloberflächen im Auflicht 57
3. Gewichtsveränderungen der Gipswürfel 58
4. Betrachtung der Gipswürfel im Rasterelektronenmikroskop . . 59
5. Vergleich der Bakterienvitalität und –aktivität mit und ohne Gipswürfelzugabe 60
6. Ergebnis 61

IV. Ermittlung von geeigneten Kompressenmaterialien . . . 61
1. Begrifflichkeit 62
2. Carbopol 62
3. Alternativen zum Carbopol 63
4. Verwendete Kompressenmaterialien 64
5. Durchführung im Labor. 66
6. Tropfenmessung 68
7. Gewichtsvergleich 72
8. Verhalten der Bakterien innerhalb unterschiedlicher Kompressenmaterialien 74
9. Ergebnis 75
10. Alternative Foliensysteme 76
11. Zusammenfassung des 2. Teils. 78

3. Teil

I. Durchführung der mikrobiellen Salzverminderung 79
1. Einleitung 79
2. natürlich verkrustetes Steinmaterial aus Dresden im Labor . . 79
1. Zielstellung und Vorüberlegungen 79
2. Herkunft des Steinmaterials 80
3. Testflächen 80
4. Probennahme Vorzustand 81
5. Applikation 81
6. Beobachtungen 83
7. Probennahme Endzustand 83
8. Ergebnis 84
3. Schloss Ksiaz, Polen 85
1. Zielstellung 85
2. Geschichte des Objektes 86
3. Testflächen 86
4. Probennahme Vorzustand 89
5. Applikation 89
6. Beobachtungen 90
7.Probennahme Endzustand 90
8. Ergebnis 91
4. Nordparadies, Hildesheimer Dom. 92
1. Vorüberlegungen und Vorversuche 92
2. Geschichte des Objektes 93
3. Testflächen 94
4. Probennahme Vorzustand 95
5. Applikation 95
6. Beobachtungen 96
7. Probennahme Endzustand 97
8. Ergebnis 97
5. Zusammenfassung. 97

II. Begleitende Untersuchungen zur Durchführung des Versuchs am Objekt 98
1.Mikroskopische Untersuchungen. 98
1. Betrachtung der Kompressenmaterialien unter UV- Licht . . 99
a. Foliensysteme 99

b. Carbopol- Kompresse 100
2. Betrachtung einer Krustenprobe unter UV- Licht 101
3. Krustenproben im Rasterelektronenmikroskop 101
4. Ergebnis 104
2. Untersuchungen zu den durch die Kompressenbehandlungen verursachten Veränderungen der Oberflächen 105
1.Flüssigkeitsaufnahmeverhalten. 105
2. Messungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit 111
3. Wasserdampfdiffusionsversuch zur Überprüfung der Verdichtung der Oberflächen durch Carbopol 113
4. Anfärbung des Probenmaterials 117
5. Quantitativer Gipsnachweis 119
a. Photometer 120
b. Ergebnis 121
3. Zusammenfassung des 3. Teils 123

4. Teil

1. Ergebnisse der durchgeführten mikrobiellen Salzverminderung . . 124
2. gewonnene Erkenntnisse. 125
3. Ausblick 126

Anhänge

Literaturverzeichnis
Fotodokumentationen
Tabellen
Datenblätter und Schriftverkehr

Einleitung

1. Vorüberlegungen

Naturstein gilt seit Menschengedenken als Sinnbild von Beständigkeit und Dauerhaftigkeit. Stein bildet das Ausgangsmaterial für zahllose Bau- und Kunstdenkmäler, und die Vielfalt der verwendeten Natursteine prägt ganze Kulturlandschaften. Seit den 70er Jahren wird der schnelle Verlust wertvoller Kulturdenkmäler immer deutlicher: auch Naturstein ist verwitterungsanfällig und unterliegt damit dem natürlichen Stoffkreislauf. Daher besteht großer Handlungsbedarf für den Erhalt von Kulturgütern aus Naturstein.

Ziel der Konservierung und Restaurierung von Objekten aus Naturstein ist in erster Linie der Erhalt der Steinsubstanz. Dabei soll aus restaurierungsethischer und -ästhetischer Sicht so wenig wie möglich am Objekt verändert werden, um neben der Objektaussage auch damit verbundene Denkmalwerte wie Bearbeitungsspuren und den „Alterswert“ zu erhalten. Ein Abwägen zwischen der tatsächlichen Notwendigkeit eines Eingriffs und einer bloßen ästhetischen Verbesserung ohne konservatorischen Effekt ist daher unerlässlich, hängt aber in der Ausführung meist von wirtschaftlichen Faktoren ab.

Ein besonderes Schadensbild stellt die Krustenbildung auf Naturstein dar. Dabei handelt es sich um eine Verwitterungsform, die auf An- und Umlagerung von Schadsalzen und anderen Partikeln an der Steinoberfläche beruht. Die Salze führen hier zu einer Verdichtung des Porenraumes, so dass die natürlichen Reaktionen zwischen Steinmaterial und Atmosphäre nur noch eingeschränkt möglich sind.

Salze im Steingefüge sind Hauptursache für die markantesten Schäden von Absanden bis zu großflächigen Substanzverlusten. Insbesondere Gips wird aufgrund der Möglichkeit, Wasser im Kristallgitter einzulagern und damit das Volumen erheblich zu verändern, allgemein als eines der gefährlichsten bauschädlichen Salze angesehen[1]. Gipskrusten liegen auf den unterschiedlichsten Natursteinen vor, wobei aufgrund der Zusammensetzung des Steinmaterials ein vermehrtes Auftreten auf kalkgebundenen Gesteinen zu beobachten ist.

Aber auch Kunst- und Kulturobjekte aus Sandstein können Gipskrusten aufweisen (Kölner Dom, Bremer Rathaus, Berliner Dom, Hamburger Rathaus, Dresdener Zwinger etc.). Sie erscheinen als schwarze Auflagen, die sowohl die Ablesbarkeit der Objektaussage als auch das Steingefüge selbst erheblich stören.

Die klassischen konservatorischen Methoden sehen für die Salzreduzierung an Natursteinen als radikalste Methode die mechanische Abnahme der schwarzen Krusten vor. Damit wird die Hauptsalzbelastung, die in der Regel an der Baustoffoberfläche vorliegt, aus dem Objekt entfernt. Die mechanische Entfernung der Krusten ist jedoch mit einer erheblichen ästhetischen Veränderung und Beeinträchtigung des Natursteinobjektes verbunden. Meist

[1] Riedel 2000, S. 20.

kommt es zu einem Substanzverlust der Oberfläche mit ihren originalen Bearbeitungsspuren. Die Salze in tieferen Gesteinslagen bleiben dabei unberücksichtigt.
Die Salzverminderung mit Kompressen ist am weitesten verbreitet und erscheint derzeit am effektivsten. Hier ist durch den Kapillarsog auch eine Tiefenwirkung gegeben. Problematisch ist bei der Verwendung von Kompressenmaterialien der mögliche Eintrag von Fremdmaterialien, die zwar weitgehend mit der Abnahme der Kompresse entfernt werden, dennoch aber auch Langzeiteinfluss auf die Steinoberflächen haben können. Auch werden nur lösliche Salze erfasst und entfernt. Weiterhin kann die erhöhte Wasserzufuhr, mit der der Kompressenauftrag häufig verbunden ist, auch zu einer Mobilisierung anderer Schadensfaktoren führen.
Die angewandten Reinigungs- und Salzreduzierungsmethoden wirken oft nur zeitlich begrenzt und sind mit regelmäßigen Nachbehandlungen verbunden oder verändern das Objekt nachhaltig. Die Hauptziele der Salzreduzierungsmaßnahme, die strukturelle Salzreduzierung im Vergleich zum Vorzustand sowie die Objektintegrität der Behandlung und damit verbundene Unterbindung von Folgeschäden und auch die optische Verbesserung des Erscheinungsbildes, sind schwer miteinander zu verbinden. Da sich jeder Naturstein in seiner Zusammensetzung, Exposition und Belastung durch Außenfaktoren unterscheidet, gibt es bis heute keine Ideallösung für die Behandlung von Salzschäden.
Eine mögliche Alternative zu den klassischen Salzverminderungsmethoden könnte die so genannte „Bioremediation“ sein. Dabei werden die Aktivitäten von Mikroorganismen für die Behandlung von Schäden genutzt. In der Steinkonservierung können salzreduzierende Bakterien in Kompressen eingebunden und auf die Steinoberflächen aufgebracht werden. Sie „veratmen“ das in den Schadsalzen gebundenen Sulfat und entfernen dieses so aus dem Gefüge. Für die Behandlung stehen verschiedene sulfatreduzierende Bakterien zur Verfügung.

2. Vorgeschichte

Mikroorganismen zeigen erheblichen Anteil am Steinzerfall. Daher sind die Verwitterung von Naturstein und ihre Ursachen zunehmend auch Thema mikrobiologischer Untersuchungen. Die Zusammenarbeit von Restauratoren und Mikrobiologen hat heute einen wichtigen Stellenwert bei der Erfassung von Schadensbildern und möglichen Behandlungsmethoden. Aus der Zusammenarbeit ergab sich die Überlegung, die Mikroorganismen auch im positiven Sinne für die Sanierung von Kunstobjekten, besonders Natursteinen, zu nutzen.
Im Januar des Jahres 2005 hielt Herr Eric May von der University of Portsmouth einen Vortrag in Hildesheim zu dem EU- Projekt BIOBRUSH, das sich mit dem Einsatz von

Mikroorganismen in der Restaurierung von städtischem Kulturgut beschäftigt[2]. Inhalt seines Vortrages waren neben calcitbildenden und nitratverwertenden Bakterien auch Bakterien, die als „Sulfatreduzierer“ bezeichnet werden.

In dem von May beschriebenen Versuch wurde verkrustetes carbonatisches Steinmaterial mit einer Kompresse aus Carbogel und Sulfatreduzierern versehen. Die Mikroorganismen sollten den Gipsgehalt des Natursteines erheblich reduzieren und damit das Schadenspotential des Schadsalzes einschränken. Nach Aussage von Herrn May konnten erfolgsversprechende Ergebnisse erzielt werden, die derzeit noch nicht publiziert sind.

3. Stand der Forschung

Die Untersuchung des Einsatzes von Mikroorganismen im Rahmen der so genannten „Bioremediation“ für die Behandlung von Salzschäden auf Naturstein ist während der letzten Jahre vermehrt Thema naturwissenschaftlicher Untersuchungen und Forschungsprojekte gewesen. Im Mittelpunkt dieser Projekte stand meist die Ermittlung einer geeigneten Methode für den Einsatz von Mikroorganismen sowie deren Bewertung.

Bei den Durchführenden handelte es sich stets um Naturwissenschaftler, die sich schwerpunktmäßig auf die mikrobielle Seite der Maßnahme konzentrieren und sich maßgeblich mit der Anzucht der Mikroben beschäftigten. Die einschlägige Literatur beschreibt die Maßnahmen stets als erfolgreich, wobei wenige detaillierte Veröffentlichungen vorliegen. Langzeitstudien gibt es nicht.

Für den Einsatz von sulfatreduzierenden Bakterien auf mit Gips belasteten Natursteinoberflächen spricht in erster Linie die angebliche „Steuerbarkeit“ des Versuchs. Die Sulfatreduzierer sind obligate Anaerobier, d.h. Bakterien, die nur in sauerstofffreier Atmosphäre länger überleben. Sie können auf Steinoberflächen nur unter einer Trennschicht zu der umgebenden Sauerstoffatmosphäre wirken. Denkbar ist dabei die Einbindung in Kompressen, sowohl in Vliesform als auch als Paste. Die Kompressenfolien oder -pasten sind einfach und weitgehend rückstandsfrei nach dem Versuch zu entfernen. Etwaige, auf den Steinoberflächen verbleibende Mikroorganismen sterben innerhalb kürzester Zeit an der Luft ab und stellen daher auch kein Schadenspotential dar.

Unklar ist, ob die Mikroorganismen wirklich absterben oder in der Lage sind, auf den Steinoberflächen längere Zeitabschnitte durch die ausreichende Nährstoffzufuhr zu überleben. Weiterhin sind mögliche Nachwirkungen wie Verfärbungen der Steinoberflächen oder das Auftreten anderer Mikroorganismen, die die Sulfatverwerter oder deren Stoffwechselprodukte nach der Salzverminderung als Nährstoffe nutzen können, bis heute nicht bekannt.

[2] **BIO**remediation for **B**uilding **R**estoration of the **U**rban **S**tone **H**eritage

4. Zielstellung

Thema der vorliegenden Diplomarbeit ist die Salzreduzierung auf mikrobiellem Wege. Die Diplomarbeit versteht sich als Fortsetzung der Facharbeit zum Diplom mit dem Titel „Voruntersuchungen zum Einsatz von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zur Reduzierung von Gipskrusten auf Sandsteinoberflächen“[3], in deren Rahmen die Durchführung des Versuches der mikrobiellen Salzreduzierung am Objekt vorbereitet wurde.
Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Praktikabilität der Versuche aus Sicht des Restaurators. Schwerpunkt soll die Bewertung der Durchführbarkeit einer „Biokompressenapplikation“ unter restauratorischen Aspekten und nicht die mikrobiologische Aufarbeitung des Einsatzes der Mikroorganismen zur Salzreduzierung sein.
Es gilt zunächst, die Rahmenbedingungen für die Versuchsdurchführung einzustellen und zu optimieren. Dazu werden zwei Stämme sulfatreduzierender Bakterien selbst angezüchtet und in Massenkultur gebracht. Im Rahmen umfangreicher Voruntersuchungen werden verschiedene Materialien für die Applikation getestet und ausgewählt.
Weiterhin wird der Versuch an Probesteinen im Labor sowie an Außenobjekten durchgeführt. Dazu mussten im Vorfeld geeignete Objekte ermittelt und umfangreich vor und nach der Maßnahme beprobt werden. Die Durchführbarkeit der Applikation der „Biokompressen“ soll ebenso wie mögliche Begleiterscheinungen belegt werden. Auch die Bakterienaktivität wird durch umfangreiche Untersuchungen überprüft. Die Auswertung des Versuchs soll abschließend zu einer Bewertung der Durchführbarkeit des Versuchs führen. Dabei fließen wirtschaftliche Aspekte wie Zeit und Kosten in die Beurteilung mit ein.

5. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist insgesamt in vier Abschnitte unterteilt. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen der Verwitterung und Gipskrustenbildung auf Sandsteinoberflächen sowie klassische Reinigungs- und Salzverminderungsmethoden exemplarisch aufgezeigt und bewertet. Im zweiten Teil wird die Vorbereitung des Versuchs sowie die Verbesserung und Einstellung der Rahmenbedingungen erläutert. Die Versuchsdurchführung sowie die anschließenden Analysen werden anhand verschiedener Objekte im dritten Teil beschrieben und bewertet. Im vierten Teil erfolgt abschließend eine Auswertung der Ergebnisse mit einem Ausblick auf etwaige Folgeversuche.

[3] Scheer 2005, S. 1.

Teil 1

I. Theoretische Grundlagen der Gipsbildung auf Naturstein

Ein Schadensbild, das auf Natursteinoberflächen beobachtet wird, muss bekannt und hinreichend untersucht sein, damit die nötigen und richtigen konservatorischen und restauratorischen Maßnahmen ausgewählt und umgesetzt werden können.
Anhand des aktuellen Forschungsstandes werden in einer Literaturauswertung die theoretischen Grundlagen der einzelnen Verwitterungsarten dargestellt und deren Auswirkungen aufgezeigt. Weiterhin werden die Mechanismen der Gipsbildung aufgezeigt und ihre Rolle an der Baustoffverwitterung belegt. Anschließend wird das Material Sandstein erläutert und die Ausbildung von Gipskrusten auf diesem Trägermaterial anhand von Beispielen verdeutlicht. Der Tatbestand wird sowohl aus naturwissenschaftlicher als auch restauratorischer Sicht erläutert.

1. Allgemein

Gipskrusten auf Natursteinen sind ein weit verbreitetes Schadensbild. Sie wurden auf Oberflächen der verschiedensten Steinmaterialien nachgewiesen, wobei ein häufigeres Auftreten auf kalkgebundenen Materialien belegt ist. Gipskrusten entstehen in mehreren Schritten durch die Ablagerung von SO_2 aus der Luft auf der Baustoffoberfläche, anschließende Reaktionen des Deposits mit den Gesteinskomponenten und den sich daraus ergebenden Folgewirkungen. Gipskrusten haben entscheidenden Anteil an der Gesteinsverwitterung und sind ein Beispiel für das Zusammenwirken chemischer und physikalischer Schadensprozesse am Bauwerk.

2. Verwitterung

An der Erdoberfläche unterliegt jedes Material, und damit auch Naturwerksteine, unter Einwirkung verschiedener Verwitterungsfaktoren wie Regen, Wind, Frost, Wärme und Strahlung langfristig einem natürlichen Zerfallsprozess[4]. Lufttemperatur und Oberflächentemperatur eines Bauwerkes, relative Feuchte der Luft und der Denkmaloberfläche, Licht- und Sonnenstrahlung, Geschwindigkeit und Richtung des Windes sowie Frost und Tau sind nur einige der Einflüsse, die auf Steinoberflächen wirken[5]. Sie können zu einer Auflockerung und Zerstörung des Gesteinsgefüges durch Aufsprengungen und Aufbrechen der Kornbildungen in einem Gestein führen[6].
Etymologisch kommt der Begriff Verwitterung von Witterung, worin wieder der Begriff Wetter steckt. Verwitterung sind damit alle Veränderungen, welche die Substanz und das Aussehen

[4] Parrini et al. 1993, S. 792.
[5] Parrini et al. 1993, S. 795.
[6] Strubendorff 1989, S. 31.

eines Werksteines im Laufe seiner Expositionszeit erfährt[7] und die durch Reaktionen der Lithosphäre mit der Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre verursacht werden[8].

Die Verwitterung von Sedimentgesteinen reiht sich in den Stoffkreislauf auf der Erde ein und wird durch die exogene Dynamik, also einen Stoff- und Energieaustausch mit der Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre gesteuert. Auch die als Baustoffe verwendeten, zum Teil künstlerisch bearbeiteten und der Atmosphäre ausgesetzten Natursteine sind Bestandteil dieses Stoffkreislaufes.

Durch viele Publikationen ist in der breiten Öffentlichkeit der Eindruck entstanden, dass die Verwitterung von Baustoffen und speziell Natursteinen ein Problem unserer Zeit sei. Die Verwitterung eines Natursteines beginnt jedoch spätestens bei seiner Gewinnung, und die komplexen physikalisch- chemischen Vorgänge beschäftigen bereits seit Jahrhunderten Dombaumeister und Wissenschaftler[9]. Eine intensivere Beachtung findet die Verwitterung von Bauwerken aus Naturwerksteinen als ein offensichtliches Zeugnis der Schädigung durch natürliche und anthropogene Einflussfaktoren seit Anfang des 20. Jahrhunderts[10].

Grundsätzlich gelten für die Verwitterung der Natursteine am Bauwerk die gleichen physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten wie in natürlicher Umgebung. Durch die Verwendung als Baustein wird das Gestein jedoch aus dem natürlichen Verband und damit aus dem geologischen Kreislauf entfernt und verwittert fortan unter anderen physikalischen, chemischen und klimatischen Bedingungen, insbesondere aber unter anthropogenen Einflüssen[11]. Jeder Standort stellt einen Sonderfall dar in Bezug auf Milieu, Temperaturverlauf, Wind, Niederschläge, Bodenfeuchte und Exposition. Ebenso zeigt jeder Stein andere Verwitterungsmerkmale, denn seine Verwitterung ist abhängig vom Material und der Umweltbelastung[12]. Berücksichtigt werden muss zusätzlich der konstruktive Verbund sowie die verwendeten Versatzmörtel. Die Modifikation des Ablaufs von Verwitterungsprozessen an Naturwerksteinen in urbaner Umgebung steht in Verbindung mit in Luft, Wasser und Boden enthaltenen Schadstoffen und mit durch lagerstättentechnische Gewinnungsmethoden, Transport, handwerkliche Bearbeitung und Verbauung bedingten Einflüssen[13].

Die zahlreichen Einzelprozesse, die den Zerfall eines Natursteines beeinflussen, lassen sich vereinfacht in drei Großprozesse, die physikalische, chemische und biologische Verwitterung unterteilen, die in der Praxis nicht getrennt sondern zusammen ablaufen und sich meist gegenseitig beeinflussen[14]:

[7] Schwarz 1986, S. 63.
[8] Amoroso / Fassina 1983, S.2.
[9] Weber 1985, S. 38.
[10] Neisel 1995, S. 1, Nowatzky 1998, S. 2.
[11] Neumann, 1994, S. 7.
[12] Strubendorff 1989, S. 31, Weber 1985, S. 38.
[13] Fitzner/Kownatzki 1991, S. 112, Cammenga/Welzel 1997, S. 269.
[14] Grimm 1984, S.16, Grasegger 1997, S. 441, Carstens 2003, S. 6, Laiz et. al. 2000, S. 77.

2.1. physikalische Verwitterung

Zur physikalischen oder mechanischen Verwitterung gehören alle Prozesse, die aufgrund mechanischer und thermischer Effekte zu einer Lockerung bis hin zum kompletten Zerfall eines Gesteinsgefüges führen[15]. Darunter fallen

1. Temperaturverwitterung, die aus der unterschiedlichen Ausdehnung von Oberfläche und tiefer liegenden Steinzonen resultiert und zur Auflockerung und Schalenbildung führen kann,
2. Frostschäden, die mit häufigem Frost- Tauwechsel zusammenhängen und aufgrund von Eiskristallisation zu einer irreversiblen Gefügedehnung führen können,
3. mechanischer Abtrag durch Wind und Wasser, die Partikel mit sich führen,
4. Quellen und Schwinden, die ebenfalls unter Wassereinfluss zu einer Gefügebelastung und damit zu Auflösung oder Schalenbildung der Oberfläche führen können sowie
5. der Einfluss von Salzen, der im Folgenden näher erläutert werden soll[16].

Die physikalische Verwitterung umfasst rein physikalische, physikalisch- chemische, physikalisch- mechanische und physikalisch- biologische Prozesse[17].

2.2. chemische Verwitterung

Die chemische Verwitterung erfasst alle Prozesse, bei denen die Bestandteile des Gesteins mit der Umgebung reagieren. Durch die chemische Verwitterung werden physikalische Prozesse initiiert, die gleichzeitig Wegbereiter für ein intensiveres Wirken chemischer Reaktionen sind[18]. Einfluss auf die chemische Verwitterung von Gestein hat in erster Linie die Deposition von Luftschadstoffen. Sie können durch trockene oder feuchte Depositionen auf die Bauwerksoberfläche gelangen, wobei die feuchte Deposition auf weit entfernte Emittenten zurückgeführt und mit dem sauren Regen gleichgesetzt werden kann, während die trockene Deposition durch nahe Emittenten verursacht wird[19]. Die Gase, Aerosole und Staubpartikel legen sich durch Adsorption, Sedimentation und Impaktion an der Oberfläche nieder und werden durch Kondensation und Niederschlag gelöst, so dass sie in das Gefüge gelangen können. Den Gasen kommt aufgrund des hohen Schadenspotentials eine besondere Bedeutung beim Steinzerfall zu: saure Schadgase wie SO_2 und die Stickoxide NO und NO_x können sehr tief in das Porennetzwerk eindringen und mit dessen innerer Oberfläche in Wechselwirkung treten[20].

Als Folge der Deposition von Luftschadstoffen stellen auch Lösungs- und Fällungsreaktionen, Reaktionen des Porenwassers mit Schadgasen sowie Reaktionen des Porenwassers mit Mineralphasen Aspekte der chemischen Verwitterung dar. Alle diese

[15] Müller 2000, S. 5, Mirwald 1997, S. 305.
[16] Carstens 2003, 6, Neisel 1995, S. 24.
[17] Neisel 1995, S.23.
[18] Machill et. Al. 1999, S. 272.
[19] Grell 1997, S. 5.
[20] Parrini 1993, S. 795, Müller 2000, S.6, Weber 1985, S. 47, Cammenga/Welzel 1997, S. 269.

Reaktionen des Baumaterials mit der Atmosphäre sind an die Anwesenheit flüssigen Wassers gebunden[21].

2.3. biologische Verwitterung

Unter der Bezeichnung „biologische Verwitterung“ werden alle schädigenden Aktivitäten von Mikro- und Makroorganismen zusammengefasst. Sie beinhaltet neben den physikalisch wirkenden Mechanismen von höheren Pflanzen, Farnen und Mosen (Wurzeldruck etc.) auch Tätigkeiten von Bakterien, Algen, Flechten, Pilze etc.[22]. Diese können die Bausubstanz nachhaltig durch mikrobiellen Abbau von Baumaterialien oder Teilen davon, durch die Bildung von Säuren und Salzen, die Veränderung des Wasserhaushaltes und ebenfalls durch mechanische Schäden durch Pilzhyphen gefährden[23]. Mikroorganismen sind hauptsächlich an der Ausbildung von Biofilmen beteiligt, die die Oberflächen nachhaltig verändern können. Diese Biofilme können aus Mikroorganismen, extracellulären Polysacchariden, eingelagerten partikulärem Material und gelösten Stoffen bestehen[24]. Der auf Steinoberflächen nachgewiesene Biofilm kann die Depositionsgeschwindigkeit von SO_2 nachhaltig beeinflussen[25].

In den letzten Jahren hat sich herausgestellt, dass die biologische Verwitterung eine weitaus größere Rolle am Steinzerfall spielt als bisher angenommen[26].

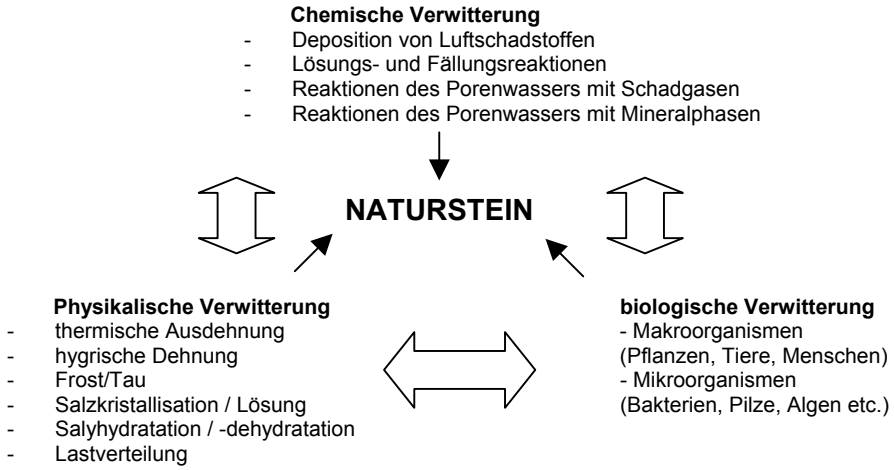


Abb. 1 wesentliche Prozesse der Natursteinverwitterung (aus Müller 2000, S.6)

[21] Neisel 1995, S. 24.
[22] Müller 2000, S. 6.
[23] Willimzig 2003, S. 79.
[24] Krumbein in Neumann 1993, S. 23, Blaschke 1988, S. 33.
[25] Carstens 2003, S. 89.
[26] Grasegger 1997, S. 440.

3. Salzbelastung als Hauptursache für Gesteinsschäden

Gesteinsschäden, die auf einer Krustenbildung beruhen, sind hauptsächlich auf eine Salzbelastung zurückzuführen[27]. Praktisch alle Baumaterialien enthalten lösliche Salze, die in Lösung im Gefüge oder lokal konzentriert vorliegen. Diese Salze bewegen sich mit dem Wasser innerhalb und an die Oberfläche des Steines. Wenn die Lösung austrocknet, kommt es zur Kristallisation und zum „Ausblühen“ der Salze. Verschiedene hygroskopische Salze wie Carbonate, Chloride, Nitrate und Sulfate wurden in Steinen nachgewiesen[28]. Wegen ihrer unterschiedlichen Löslichkeit und dem damit verbundenen Kristallisationsvermögen kristallisieren sie in unterschiedlichen Bereichen an der Bauwerksoberfläche aus.

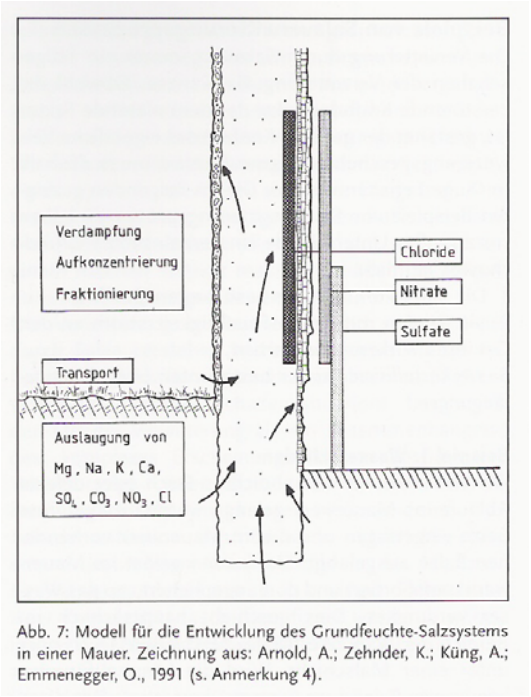


Abb. 7: Modell für die Entwicklung des Grundfeuchte-Salzsystems in einer Mauer. Zeichnung aus: Arnold, A.; Zehnder, K.; Küng, A.; Emmenegger, O., 1991 (s. Anmerkung 4).

Abb. 2
Zonen der Auskristallisation verschiedener bauschädlicher Salze an einer Mauer (aus Zehnder 2003, S.16.)

Die Wirkung des Salzes hängt im Allgemeinen von der Porenstruktur und dem Druck ab, der sich während des Kristallisationsprozesses innerhalb der Steinporen aufbaut[29].

Analysen von Baustoffen und dabei insbesondere Natursteinen haben gezeigt, dass Sulfate, meist Gips, die häufigsten bauschädlichen Salze sind[30]. Die Sulfatkonzentration betrug in einigen Fällen bis zu 80%[31]. Dabei findet sich die höchste Gipskonzentration auf der Steinoberfläche, aber auch noch in mehreren Zentimetern Tiefe konnten Gipskristalle nachgewiesen werden[32]. Die Schwefel- Konzentration im frisch gebrochenen Stein ist normalerweise sehr gering, deswegen wird angenommen, dass Schwefel in verbautem Steinmaterial hauptsächlich aus der Luftverschmutzung auf die Oberflächen gelangt[33]. Untersuchte bruchfrische Steine enthielten kleine Anteile von Gips und Magnesiumsulfat, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Stein selbst unter Umständen kleine Anteile an diesen Salzen enthält[34].

[27] Grell 1997, S. 8, Charola 2003, S.19.
[28] Laiz et al. 2000, S.78, Cammenga/Welzel 1997, S.270.
[29] Rossi-Manaresi/Tucci 1991, S. 58.
[30] Schuh 1987, S. 49, Weber 1985, S. 44.
[31] Hoke 1978, S. 121.
[32] Hoke 1978, S.124, Neumann 1994, S. 25, Zehnder 2003, S.17, Matteini 2003, S. 174.
[33] Nord/Ericsson 1993, S. 28.
[34] Zehnder/Arnold 1984, S. 33.

4. Gips

Gips ist chemisch betrachtet $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, also Calciumsulfat- Dihydrat. Es wird auch als Leichtspat, Marienglas, Fraueneis, Selenit oder Alabaster bezeichnet[35]. Calciumsulfat kann in verschiedenen Hydratstufen, als Anhydrit $CaSO_4$, Halbhydrat $CaSO_4 \cdot ½H_2O$ oder als Gips $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ vorliegen.

Gips ist eines der weltweit am meisten verbreiteten Minerale. Beim Ausfall aus wässrigen Lösungen entsteht Gips bei Temperaturen unter 40°C. Liegen höhere Temperaturen vor, wird direkt Anhydrit gebildet. In Gesteinen sind beide Formen häufig anzutreffen. Natürliche Formen des Halbhydrates existieren nicht. Gips kommt als konkretionäre Ausscheidung in Tonen und Mergeln, als Verwitterungsprodukt sulfidischer Erze, als Verdunstungsrest sulfathaltiger Wässer in Wüsten und vor allem als Gestein im Bildungsbereich von Salzlagerstätten (zusammen mit Anhydrit) vor. Künstlich hergestellter Gips entsteht unter Anderem im Zuge der Entschwefelung von Rauchgasen in Kraftwerken, in denen fossile Brennstoffe verwertet werden[36].

Gips stellte und stellt einen wichtigen Baustoff für die Herstellung von Mörteln und Verputzen dar und kann bereits als Gestein und somit originäres Baumaterial Eingang in das Gefüge eines Denkmals gefunden haben. Ähnliches gilt auch für das Anhydrit.

Gips zählt zur Gruppe der „gering“ wasserlöslichen Salze und kann somit als wenig mobil bezeichnet werden. Allerdings ist der Fremdioneneinfluss auf die Gipslöslichkeit vergleichsweise groß, so dass die Löslichkeit von Gips ggf. erheblich durch andere Salze erhöht werden kann[37]. Gips kann das im Molekül enthaltene Kristallwasser nur bei Temperaturen über 50°C abgeben, so dass es in der Regel nicht zu einer Dehydrierung des Gipses kommt. Umgekehrt können die Hydratstufen Anhydrit und Halbhydrat aber sehr wohl Kristallwasser einlagern[38]. Diese Vorgänge sind mit starken Volumenveränderungen und Hydratationsdrücken verbunden, die in der Tabelle[39] verdeutlicht werden:

Mineralumkristallisation	**Chemische Reaktion**	**Molvolumen (cm³ / mol)**		**Volumenzunahme**	
Ausgangsmaterialien	**Produkt**	**vorher**	**nachher**	**Faktor**	**%**
Anhydrit	Gips	46	74	1,61	60,9
$CaSO_4 + H_2O$	$CaSO_4 \cdot H_2O$				
Bassanit	Gips	53	74	1,40	39,6
$CaSO_4 \cdot ½H_2O + 1,5\ H_2O$	$CaSO_4 \cdot H_2O$				

Tabelle 1: mit der Wasseraufnahme verbundene Volumenzunahme bei Anhydrit und Bassanit

[35] Bläuer Böhm 1988, S.51, Mainusch 2001, S.84.
[36] Mainusch 2001, S. 84.
[37] Mainusch 2001, S. 85, Riedel 2000, S. 22.
[38] Neisel 1995, S.41, Schuh 1987, S.49.
[39] Neisel in Anlehnung an Snethlage 1984 und Nägele 1990, Weber 1985, S. 44.

Das Schadenspotential des Schadsalzes Gips liegt damit vor allem in der Gipskristallisation und - Quellung[40]. Die Kristallisations- und Hydratationsdrücke von Gips und Halbhydrat unterscheiden sich ganz wesentlich[41] und sind abhängig von den Temperaturverhältnissen und dem Übersättigungsgrad. Ein plötzlicher Wechsel der Feuchtigkeit begünstigt das Wachstum von Gips durch Rekristallisation[42].
Der Kornverbund des Natursteins kann durch die Veränderungen erheblich gestört werden.
Die Schadensrelevanz von Gips für Denkmale aus mineralischer Bausubstanz steht weiterhin wesentlich in Zusammenhang mit der Umwandlungsreaktion von Kalk in Gips. Unter der Einwirkung von SO_x- haltiger Luft in Verbindung mit Feuchte können auf diese Weise wichtige Materialkomponenten wie Kalkmörtel, Verputze oder calcitische Gesteine zu Gips umgewandelt werden entsprechend dem Chemismus[43]:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$
$$SO_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow SO_3$$
$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$
$$CaCO_3 + H_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2 + H_2O$$

Die so gebildeten Gipsmoleküle sind etwa um das Doppelte größer als die Calcitmoleküle, durch deren Umwandlung sie entstanden sind. Damit geht auch eine Veränderung der Wasserlöslichkeit einher. Calcit ist mit einer Wasserlöslichkeit von ca. 0,014 g/l (bei 20°C) deutlich schwerer löslich als Gips (2,4 g/l[44]), so dass nach der Umwandlung von Kalk zu Gips ein sehr viel wasserempfindlicheres System vorliegt[45].
Gips wird allgemein als eines der gefährlichsten bauschädlichen Salze angesehen[46].

5. Ursachen für die Entstehung von Gipskrusten

Grundvoraussetzung für das Wachstum von Gipskrusten ist ein Minimum an Wasser[47]. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Wasser absorbiert an der Oberfläche, kondensiert in Mikroporen oder flüssig in offenen Systemen vorliegt, wobei letzteres bevorzugt erscheint. Gipskrusten entstehen auch bei ansonsten optimalen Bedingungen nicht, wenn die relative Luftfeuchte unter 40% liegt[48]. Je höher die Luftfeuchte, desto mehr Gips bildet sich.
Die beiden für die Gipsbildung notwendigen Ionen Calcium und Sulfat werden auf unterschiedliche Art und Weise im bzw. auf dem Objekt zusammengeführt.

[40] Neumann 1994, S.151.
[41] Weber in Weber 1994, S. 632ff.
[42] Gruber/Sternad 1981, S. 165.
[43] Weber in Weber 1994, S. 627, Ranalli et. al. 2000, S. 233.
[44] Arendt/Seele 2000, S. 84, Weber 1985, S.47.
[45] Mainusch 2001, S.87.
[46] Riedel 2003,S. 185.
[47] Hoke 1978, S. 124.
[48] Bernal / Lopez 2004, S. 52.

5.1. Schwefel / Sulfate

Für die Bildung von Gipskrusten auf Naturstein sind vor allem anthropogen verursachte Schwefel- Immissionen verantwortlich: sie entstehen durch Kraftwerke, Industrie, private Haushalte und auch auf natürlichem Wege durch Vulkanismus.

SO_2 und seine Reaktionsprodukte sind in der Luft in unterschiedlichsten Konzentrationen jahreszeitenabhängig enthalten[49]. Die Schwefel- Immissionen gelangen durch trockene Deposition von SO_2 aus der Luft auf die Steinoberfläche. Die SO_2- Deposition ist sehr groß und erreicht eine hohe Geschwindigkeit.

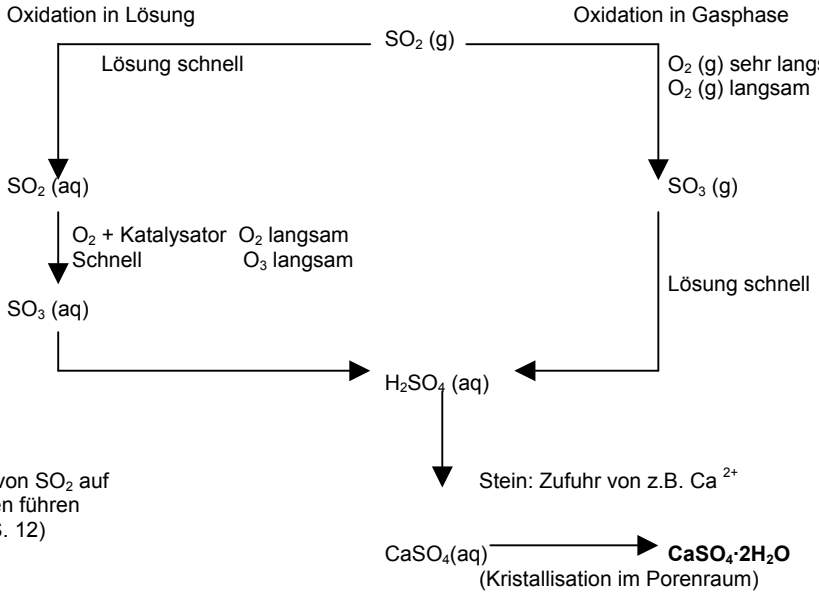


Abb. 3
Reaktionen,
die zur Deposition von SO_2 auf
Gesteinsoberflächen führen
(aus Müller 2000, S. 12)

Der Feuchtegehalt des Gesteins sowie die kontinuierliche SO_2- Ausscheidung führen zu einer Absenkung des pH- Wertes im Stein. Damit nimmt die Löslichkeit von SO_2 im Feuchtefilm ab[50].

Die Umwandlung des S (IV) im Schwefeldioxid zu S (VI) im Sulfat erfolgt im Stein:

SO_2 gelangt, im Wasserfilm gelöst, auf die Mineralkörner, wo Hydrogensulfit und Hydroniumionen in dissoziierter Form entstehen. Mit Wasserstoffperoxid und Ozon als Oxidationsmittel erfolgt die Oxidation des Schwefels in der flüssigen Phase[51].

Da die Reaktion stark pH- abhängig ist, wird bei unterschiedlichen pH- Werten jeweils eines der Oxidationsmittel bevorzugt. Liegt der pH zwischen 1,5 und 5, so ist das Oxidationsmittel Wasserstoffperoxid, liegt der pH- Wert höher, so wird Ozon als Oxidationsmittel genutzt. Gegebenenfalls werden auch Katalysatoren wie Eisen- und Manganionen mit oxidiertem

[49] Gruber/Sternad 1981, S. 161.
[50] Grell 1997, S. 12f.
[51] Weber 1985, S. 45, Ranalli et. al. 2000, S. 233, Müller 2000, S.12, Bernal / Lopez 204, S. 51.

Luftsauerstoff genutzt[52]. Verschiedene Katalysatoren unterstützen dabei auch die Bildung von verschiedenen Hydratationsstufen[53].

Als weitere mögliche Quellen für Sulfat und SO_2 werden neben der trockenen Deposition auch die Atmosphäre, Dreck, Gipszugaben zur Bausubstanz, Sulfat im Grund-, Regen- und Meerwasser vermutet[54]. Der Schwefel in schwarzen Krusten stammt in erster Linie aus der Umwelt: sauerer Regen, vulkanisiertes Gummi, Asphalt und andere organische Verbindungen. Er ist chemisch hauptsächlich als Sulfat, in aliphatischen Ketten, aromatischen Hydrocarbonen etc. gebunden[55].

5.2. Calcium

Als Calciumquelle kommen auf Sandsteinen z.B. Fugmörtel in Betracht[56]. Auch frühere Restaurierungsmaßnahmen, bei denen Material mit Anteil an löslichen Salzen bzw. moderne Baustoffe wie Portlandzement in das Objekt eingebracht wurden, können als Calciumquelle dienen, ebenso wie der Grobstaub aus der Luft[57].

Weiterhin kann Calcit auch bei der Photosynthese der auf dem Stein wachsenden Algen freiwerden. Dabei wird dem Kohlensäuregleichgewicht in wässriger Lösung CO_2 entzogen. CO_3^{2-} fällt mit den in der Lösung vorhandenen Ca^{2+} - Ionen als Calcit aus und kann gebunden werden.

Anders als Kalksteine beinhalten die nicht carbonatisch gebundenen Sandsteine keine Calciumquelle. Das Calcium für die Bildung von Gipskrusten stammt ausschließlich aus der Umgebung.

Bei Versuchen an verschiedenen Elbsandsteinen konnte nachgewiesen werden, dass das Carbonat in der Kruste nicht aus dem Gestein selbst stammt[58].

Die Calciumionen stehen nachträglich für die Reaktion mit Schwefel zur Verfügung und verursachen in mehreren Schritten die Bildung von Gipskrusten.

[52] Neumann 1994, S. 21, Schwarz 1986, S.110.
[53] Bernal / Lopez 2004, S. 52.
[54] Rösch/Schwarz 1993, S.224f.
[55] Nord/Ericsson 1993, S. 34.
[56] Müller 2000, S. 111 zum Fruchtkasten des Klosters Maulbronn.
[57] Kraus/Auras 1997, S. 723, Neumann 1994, S. 127.
[58] Machill et.al, 1998, S. 289/298, Grunert 1978.

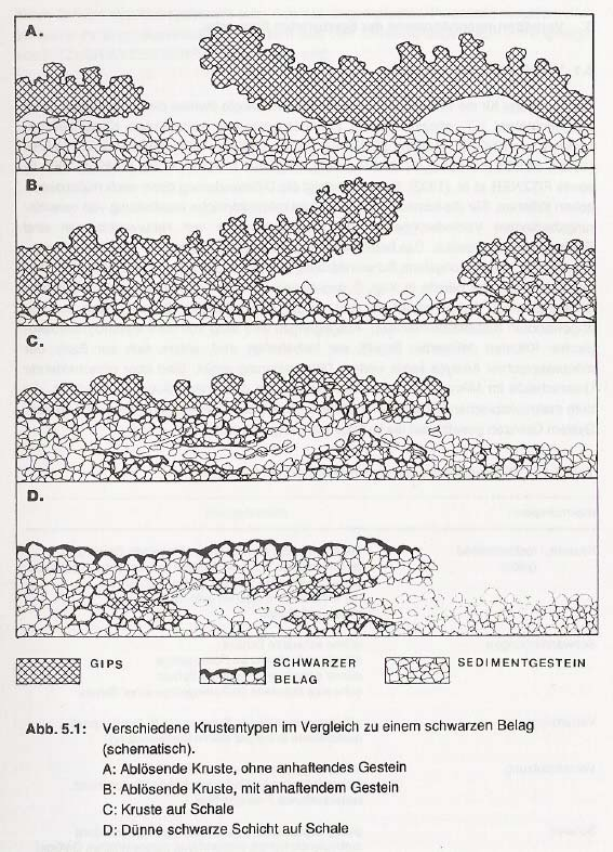


Abb. 5.1: Verschiedene Krustentypen im Vergleich zu einem schwarzen Belag (schematisch).
A: Ablösende Kruste, ohne anhaftendes Gestein
B: Ablösende Kruste, mit anhaftendem Gestein
C: Kruste auf Schale
D: Dünne schwarze Schicht auf Schale

Abb. 4 verschiedene Krustentypen (aus Neumann 1994, S. 54)

Bei der Auflösung des Kornverbandes durch Gips kommt es an der Steinoberfläche vorerst zu einer sekundären gips- geschützten Grundmasse mit sekundärer Porosität[59]. Daran schließt sich eine Zone der Gefügelockerung (aufgrund der Oxidation der Bestandteile) zwischen der veränderten Oberfläche und dem noch intakten Gesteinskern an. Die obersten Kornlagen des Gesteins sind durch Gips stark verdichtet und teilweise in die Gipskruste mit eingebunden. Krustenbildung führt also zu einer erheblichen strukturellen Veränderung.

Der Gipsgehalt in der Kruste nimmt durch Umlagerungen und Kristallisation immer weiter zu, wodurch es abschließend zu einer Abhebung vom Untergrund und Aufplatzen der Oberfläche durch örtlichen Druck kommt[60]. Dabei löst sich nicht nur die Gipskruste, sondern auch die obersten Steinlagen, die eine stärkere Affinität zu der Gipskruste als zu dem darunter liegenden intakten Gestein zeigen, mit vom Untergrund ab. Dieses Schadensbild führt zu einer ausgeprägten Reliefbildung, die expositions- und gesteinsspezifisch ist und die Objektaussage erheblich stören kann.

6. Auftreten und Aussehen

Gipskrusten entstehen hauptsächlich im Übergangsbereich zwischen beregneten und regengeschützten Fassadenbereichen. Sie treten auf allen Quaderoberflächen auf, an denen keine Auswaschung oder direkte Beregnung stattfindet. Bevorzugt sind Bereiche langsamer Trocknung mit daraus resultierender stärkerer SO_2 – Aufnahme aus der Luft.

Gipskrusten verändern das optische Erscheinungsbild von Denkmälern aus Naturstein nachhaltig. Sie zeigen meist eine graue bis schwarze Färbung von unterschiedlicher Dicke, die die Ablesbarkeit der Architekturaussage durch eine Betonung der

[59] Neumann 1994, S. 5/143, Rossi- Manaresi/Tucci 1991, S. 53.
[60] Neumann 1994, S. 143f.

Wasserrückhaltezonen, in denen die Krusten vornehmlich auftauchen, erheblich verändert. Je länger die Krusten auf der Objektoberfläche bestehen bleiben, desto mehr optische Eigendynamik entwickeln sie durch Aufbrechen der Oberflächen bis hin zu massiven Oberflächenverlusten, die dem Objekt eine sehr unregelmäßige Oberfläche (stark verkrustete Bereiche direkt neben frei liegendem Gesteinskern) verleihen.
Giskrusten auf Naturstein können höckerig, bläschenförmig, verästelt, rosettenartig, korallenartig oder blumenkohlartig aussehen[61].

Abb. 5 Gipskrusten auf Sandstein (aus Klemm 2005, S.47)

Gipskrusten sind durch anhaftende oder eingeschlossene Fremdpartikel gekennzeichnet. Sie können bei nicht- carbonatischen Steinen aus mehr als 100 unterschiedlichen Bestandteilen bestehen. Hauptbestandteile sind Quarz und Silikat- Minerale, Eisenverbindungen wie Eisenoxide, Hydroxide und Eisensulfate, Schmutz und Dreck[62]. Weiterhin sind hauptsächlich wasserunlösliche Bestandteile wie Ruß, Staub, Gummiabrieb, Sporen, Pollen, Smog, reine Kohlenwasserstoffe aromatischer und aliphatischer Natur und Öltröpfchen[63], die nicht aus dem Stein sondern aus dem Luftstaub stammen und in die mineralische Matrix eingebunden sind[64], in den Krusten nachweisbar. Diese Bestandteile können sowohl biogene Partikel und Mikroorganismen als auch amorphe oder kristallisierte anorganische Partikel sein. Auch durch den Ablauf des Regenwassers umgelagerte resedimentierte Bestandteile des Steines und aus dem Fugmörtel sind in den Krusten enthalten.

[61] Rösch/Schwarz 1993, 224.
[62] Nord/Ericsson 1993, S. 33.
[63] Strubendorff 1989, S. 39.
[64] Ranalli et. Al. 2000, S. 233.

Die dunkelgraue bis schwarze Farbigkeit geht hauptsächlich auf in der Gipskruste angelagerte Fremdpartikel zurück[65]. Eine genaue Analyse der gesamten Krustenbestandteile ist Machill et.al. zu entnehmen[66].

Mikroskopisch sind Gipskrusten durch unterschiedliche Morphologie, Größe und Anordnung der Gipskristalle gekennzeichnet. Diese ist unabhängig vom Internaufbau der Kruste und ihrer Position am Bauwerk.

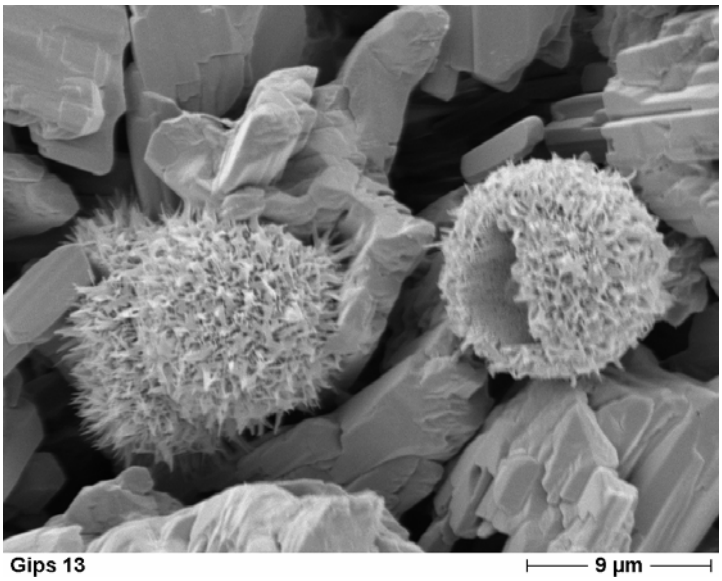


Abb. 6 REM- Aufnahme von radialstrahligen Gipskristallen

Charakteristisch ist die Anordnung zu halbkugelförmigen Aggregaten. Die Gipskristalle können radialstrahlig, pustelig- knospig oder nadelig- spießig aussehen[67].

7. Verwitterung von Sandsteinen

7.1. Sandsteine Nomenklatur

Sandsteine gehören zur Gruppe der klastischen terrigenen Sedimente. Die Gesteinsfragmente bestehen im Wesentlichen aus Resten verwitterter magmatischer, sedimentärer und metamorpher Gesteine[68]. Klastische Sedimente werden nach dem Durchmesser ihrer Kornkomponenten eingeteilt[69]. So werden nach DIN 4022 die Sedimente als Sand und Sandsteine bezeichnet, die einen Korndurchmesser zwischen 0,06 und 2 mm besitzen. Hierbei sind Sandsteine als Festgesteine zu betrachten, d.h. die einzelnen Körner

[65] Gauri et. al. 1989, S. 201.
[66] Machill et.al. 1998, S. 288ff.
[67] Neumann 1994, S. 153.
[68] Müller 2000, S. 15.
[69] Füchtbauer 1988, Tucker, 1985.

sind durch ein Bindemittel oder Zement im Gesteinsgefüge fixiert[70]. Die Kornkomponenten sind im Wesentlichen Quarz[71], daneben auch Feldspat, Gesteinsbruchstücke, Glimmer und Akzessorien. Sandsteine sind in mehreren geologischen Perioden entstanden und unterscheiden sich nicht nur in der Zusammensetzung, sondern damit verbunden auch optisch erheblich.

Sandsteine können kieselig, tonig, carbonatisch oder eisenhaltig gebunden sein, wobei nach Ausbildung und Funktion des Bindemittels drei Haupttypen vorkommen: Kontaktzement, Porenzement und Basalzement[72]. Sandsteine besitzen fast ausnahmslos ein offenes Porensystem. Die Porosität und damit auch alle wichtigen Porenkenngrößen werden im Wesentlichen durch drei Größen beeinflusst: Die Struktur der Körner, Anteil und Art der Matrix und der diagenetisch bedingte Kompaktionsgrad[73].

Namensgebend für die Sandsteine ist die quaderförmige Absonderung, bedingt durch ein dreifach orthogonales Kluftsystem, das sich auf den Schichtflächen aufbaut[74].

Sandsteine nehmen von allen Baugesteinen die häufigste Verwendung in Deutschland ein und wurden in Architektur und Skulptur mehr als andere Gesteinsarten verwendet. Sie werden in fast ganz Süd- und Mitteldeutschland in den unterschiedlichsten Färbungen abgebaut. Durch das geringe Raumgewicht bietet sich der Stein auch zum Transport in entfernte Gebiete an.

Das Gestein wird bereits seit der Romanik als Fassadenmaterial an Kirchen und für Baudetails wie Säulen, Simse, Treppen, Geländer, Park- und Gartenanlagen sowie Gräber und Brunnen verwendet[75]. Heute dient Sandstein vermehrt als Verblendmaterial im Hausbau.

7.2. Verwitterung von Sandsteinen

Typische Schadensbilder an Sandstein sind oberflächenparallele Abschuppungen, Absanden von Gesteinssubstanz, Risse, weiterhin auch starke Verfärbungen, Verrußungen und Verkrustungen an der Oberfläche[76]. Bei Zutritt von Wasser wittern die Sandsteine entlang der Klüfte und Schichtfugen, was zu einer fortschreitenden Erweiterung und Abrundung der Kluftfugen führt und die typische quaderförmige Absonderung hervorbringt[77].

Auf Sandsteinen verursacht die Luftverschmutzung weiterhin oft dünne, harte schwarze Krusten auf der Oberfläche. Die makroskopisch sichtbaren schwarzen Krusten bestehen

[70] Müller 2000, S. 15.
[71] Müller, F. 1997, S.329.
[72] Neisel 1995, S. 9.
[73] Müller 2000, S. 18.
[74] Ehling 1999, S. 90.
[75] Müller, F. 1997, S. 328.
[76] Strubendorff 1989, S. 39.
[77] Ehling 1999, S. 90.

hauptsächlich aus Gips und Calcit mit vielen verschiedenen eingebundenen Stäuben[78]. Anders als die schwarzen Gipskrusten auf Kalkstein sind die schwarzen Auflagen auf Sandstein eher dünn und mit dem Trägermaterial fest verbunden. Die Krusten sind normalerweise 0,02 bis 0,2 mm dick und zeigen keinen Glanz[79].

Ein carbonatisches Bindemittel zeigt generell eine geringere Festigkeit als ein silikatisches, da der Kalk um ein Vielfaches löslicher ist. Die Aufnahme von SO_2 ist bei Kalkgesteinen größer, da hier der Säuregehalt des Feuchtefilms gepuffert wird, während dieser Vorgang bei Sandsteinen, in denen eher ein saueres Milieu besteht, nicht erfolgt [80]. Kieselig gebundene Sandsteine sind also generell weniger verwitterungsgefährdet als carbonatisch gebundene Sandsteine und Kalksandsteine[81] und zeigen daher auch seltener Belastungen durch Gipskrusten, da der Stein die Calciumquelle für die Gipsbildung nicht selber liefert. Dennoch weisen auch Sandsteine zum Teil nur geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Einwirkungen auf, sie sind wasserempfindlich und bieten Angriffsflächen für die Schwefeloxide der Luft.

Verursacht werden die Schäden an Sandsteinen durch zu geringe Zementation, empfindliche Zementationsmittel, Frost, den partiell hohen Gehalt an Pyrit (aus dem schwefelige Säure und damit eine Zersetzung des Gesteins entstehen kann) sowie eine hohe Anfälligkeit gegenüber der Mikroflora aufgrund der hohen Porosität[82].

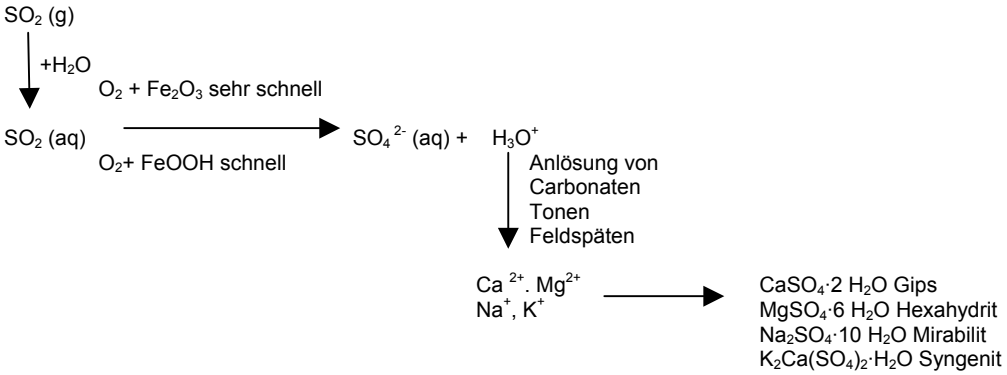


Abb. 7 Schema für die Reaktionen von SO_2 mit den Bestandteilen des Sandsteines (aus Müller 2000, S. 120)

Die Mechanismen der Gipsbildung auf Sandsteinen werden vermutlich durch die Verstärkung der Adsorption von carbonatischen Staubpartikeln aufgrund von Bakterientätigkeit verstärkt, ebenso wie deren Reaktion mit den durch die Mikroorganismen ausgeschiedenen Säuren[83].

[78] Gruber/Sternad 1981, S. 165.
[79] Nord/Ericsson 1993, S. 25, Neumann 1994, S. 117.
[80] Machill et.al. 1998, S. 277, Grell 1997, S. 13.
[81] Strubendorff 1989, S. 39.
[82] Müller, F. 1997, S. 336.
[83] Grell 1997, S.17.

7.3. Beispiele

Es gibt zahlreiche Belege für Gipskrusten auf Sandstein. So konnten unter anderem an den Gurtgesimsen aus Sandstein des Rattenfänger- Hauses in Hameln dicke Krusten nachgewiesen werden, die auf Gipsanreicherung und $CaCO_3$- Umlagerungen zurückgehen. Auch an der Alten Pinakothek in München ergab die Auswertung der aufliegenden Krusten Sulfatanteile von 15 und 35 Gew%. Das bedeutet 25 bis 50 Gew% Gips. Der ursprüngliche Sandstein war gipsfrei, auch im Mörtel wurde kein Gips festgestellt[84].

Das Leineschloss in Hannover, das hauptsächlich aus dem Deister Wealdensandstein besteht, zeigte bei einer Untersuchung im Jahre 1994 umfangreiche Gipskrustenbildung auf verschiedenen Bauteilen[85].

Am Zwickauer Dom wurde ebenfalls ein Elbsandstein, vermutlich aus Cotta, verbaut. Hier wurden ebenfalls Gipskrusten nachgewiesen, die vermutlich auf die hohe Feuchte in dem feinkörnigen Elbsandstein und die damit verbundene stärkere SO_2- Deposition zurückzuführen sind[86].

Auch am Kölner Dom, an dem im 18. Jahrhundert Schlaitdorfer Sandstein verbaut wurde, konnten Gipskrusten beobachtet werden[87], die jedoch auf dem später verbauten Obernkirchener Sandstein deutlich weniger stark ausfielen.

Die Untersuchung der Salzbelastung am Erfurter Dom ergab Gipsbelastungen von 15 bis 75% bei einem toniggebundenen Sandsteinmaterial[88].

Die beiden am Zeitzer Dom verbauten Sandsteine, einer kieselig gebunden, der andere tonig- ferritisch, wiesen bei einer Untersuchung 1994 beide Gips auf, wobei der Nachweis eine deutlich höhere Belastung bei dem tonig- ferritischen Sandstein zeigte[89].

Die Salzausblühungen am Dresdener Zwinger bestehen hauptsächlich aus Alkalinitraten, -sulfaten und Gips[90].

Die Untersuchung verschiedener Objekte in Berlin sowie von Teilen des Zwingers in Dresden und von vier Grabsteinen des Jüdischen Friedhofes „An der Strangriede“ in Hannover ergab an fast allen untersuchten Sandsteinobjekten eine Gipsbelastung[91].

Etwa 30 verschiedene Elbsandsteine, die im Oktober 2005 einem Sulfatnachweis unterzogen wurden, wiesen jedoch kein Sulfat in den aufliegenden schwarzen Krusten auf.

[84] Weber 1985, S. 49.
[85] Neumann 1994, S. 62ff.
[86] Neumann 1994, S. 74.
[87] Honold 1979, S. 127.
[88] Grell 1997, S. 67.
[89] Neumann 1994, S. 105.
[90] Frost et al. 1988, S. 43.
[91] Scheer 2005, S. 8.

8. Zusammenfassung

Die Verwitterung von Natursteinen ist Teil eines natürlichen Stoffkreislaufes. Als typisches Verwitterungsbild von Naturstein ist die Krustenbildung anzusehen. Gipskrusten liegen auf den verschiedensten Denkmalgesteinen vor.

Auch Sandsteine zeigen Krustenbildung, wobei Gipskrusten für silikatisch gebundene Steine weniger typisch als für carbonatische sind, da der Stein nicht die optimalen Voraussetzungen für die Bildung von Gipskrusten liefert. Die Gipskrusten auf Sandsteinen bestehen zum größten Teil aus Partikeln, die aus der Luft stammen und sich auf den Steinoberflächen abgelagert haben und reagieren.

Gipskrusten führen zu einer strukturellen Veränderung des Objektes: durch die zusätzliche „Anlagerungsschicht“ kommt es zu einer Verdichtung des Materials, Verlagerung des Verdunstungshorizontes und einer allgemeinen Störung der feuchtetechnischen Eigenschaften des Baustoffs.

Auch das optische Erscheinungsbild von Denkmälern aus Naturstein wird durch Krustenbildung nachhaltig verändert. Die graue bis schwarze Kruste von unterschiedlicher Dicke verändert die Ablesbarkeit der Architekturaussage durch eine Betonung der Wasserrückhaltezonen, in denen die Krusten vornehmlich auftauchen, erheblich. Je länger die Krusten auf der Objektoberfläche bestehen bleiben, desto mehr optische Eigendynamik entwickeln sie durch Aufbrechen der Oberflächen bis hin zu massiven Oberflächenverlusten, die dem Objekt eine sehr unregelmäßige Oberfläche verleihen.

Die Bildung von Gipskrusten kann im Vorfeld durch die Verwendung geeigneter Baumaterialien weitgehend unterbunden werden. Keinesfalls dürfen schadsalzhaltige Mörtel verwendet werden.

Durch die Absenkung des SO_4^{2-} -Ausstoßes in den letzten Jahren dürfte die erneute Bildung von Gipskrusten in nächster Zeit weniger intensiv ausfallen. Die Behandlung bereits entstandener Gipskrusten mit verschiedenen Methoden ist Gegenstand zahlreicher restauratorischer Maßnahmen. Eine Ideallösung liegt bis heute nicht vor.

II. Klassische Reinigungs- und Salzreduzierungsmethoden

1. Überblick

Bei der Reinigung von Baustoffen im allgemeinen und Natursteinen im besonderen geht es nicht allein um den ästhetischen Erfolg, sondern auch um die weitgehende Beseitigung von Schadstoffen von den Oberflächen und aus den oberflächennahen Zonen und um die Öffnung der Poren. Heute stehen für die Reinigung von Objekten aus Naturstein eine Vielzahl von Reinigungsverfahren zur Verfügung.

Die Reinigung von Objekten aus Naturstein sollte möglichst schonend und ohne Verluste an originaler Oberfläche vor sich gehen[92]. Grundsätzlich ist mit der Reinigung aber auch immer eine Gefährdung des Natursteins verbunden. Der Grad der Gefährdung hängt dabei vom Zustand des Objektes und von der qualitativen Ausführung durch die Fachleute ab. In allen Fällen geht mit der Reinigung ein mehr oder weniger starker Materialverlust einher, der bis zur totalen Oberflächenzerstörung reichen kann. Auch die Folgeschäden von Reinigungsmaßnahmen bergen ein erhebliches Risiko für die Steinsubstanz.

2. Methoden

2.1. Reinigungsziele

Reinigungsziele können die technische Vorarbeit im Rahmen einer Untergrundvorbereitung, die Wiederherstellung der feuchtetechnischen Eigenschaften des Baustoffes sowie die Verbesserung der ästhetischen Wirkung eines Bauwerks oder anderen Steinobjektes sein[93].

Im Einzelnen beinhaltet die Reinigung von Fassaden folgende Bereiche:

Natursteinreinigung, Entfernung von Altanstrichen, Reinigung von Anstrichoberflächen, Beseitigung von Graffitis, vorbereitende Arbeiten für eine Betoninstandsetzung, Fugenausräumung, Beseitigung von Verfärbungen, Salzverminderung in Oberflächenbereichen, Farbentfernung auf Holzuntergründen und Abtrag von Anstrichen auf Stukkaturen[94].

2.2. Reinigungsmethoden

Zur Reinigung von Natursteinoberflächen und damit einhergehender Entfernung oder zumindest Reduzierung von Gipskrusten sind derzeit mechanische, chemische und physikalische Methoden im Einsatz. Zu nennen sind hier die Reinigung durch Niederdruckmikrotrockenstrahlverfahren, Mikrofeinmeißel oder händische Abnahme der Salzausblühungen, Laserreinigung, Abwaschen mit H_2O, Injektionskompressen, Elektrophysikalische Verfahren, Salzumwandlungsmethoden, Sanier- oder Opferputz,

[92] Rau 1987, S. 54.
[93] Auras et.al 1997, S. 685.
[94] Goretzki in Weber 1994, S. 268.

Trockenlegungs- oder Hydrophobierungsmaßnahmen sowie die Reinigung mit Pasten und Kompressen dauernass oder trocknend. Auch zahlreiche weitere Verfahren sind bekannt, haben sich in der Anwendung aber nicht durchgesetzt.
Die Reinigung von Natursteinoberflächen kann in drei Großbereiche eingeteilt werden: trockene mechanische Verfahren, nasse sowie chemische Reinigungsverfahren.

2.2.a) Trockene mechanische Verfahren

Bei den trockenen mechanischen Verfahren wird ausschließlich ein Abarbeiten der Oberfläche durch Überarbeiten bzw. durch Abstrahlen vorgenommen. Wasser kommt dabei nicht zum Einsatz. Der Nachteil der trockenen Reinigung liegt im Substanzverlust, der generell auf ein Minimum beschränkt werden sollte. Im Einzelnen kommen als trockene mechanische Verfahren Abbürsten und Abschleifen, steinmetzmäßiges Überarbeiten, (das jedoch bei unter Denkmalschutz stehenden Objekten aus denkmalpflegerischer Sicht möglichst vermieden werden sollte[95]), trockene Strahlverfahren sowie Ultraschall und Laser zum Einsatz. Eine Nachreinigung in Form von Entstaubung ist notwendig[96].

2.2.b) Nasse Reinigungsverfahren

Bei den nassen Reinigungsverfahren spielt Wasser als Reinigungsmittel bzw. als Trägersubstanz für Strahlgüter eine wesentliche Rolle. Dabei kommt es immer auch zu einer Durchfeuchtung des Baustoffes, durch die Salze aktiviert und nach der Reinigung beim Trocknen der Oberflächen austreten können. Die nasse Reinigung umfasst drucklose Reinigung, Reinigung mit Druck, Reinigung mit Wasser unter Druck mit Zusatz von Granulaten, nasse Strahlverfahren sowie Niederdruck- Rotationswirbelverfahren.

2.2.c) Chemische Reinigungsverfahren

Die chemischen Reinigungsverfahren wurden in den 60er und 70er Jahren zur Reinigung von Natursteinen durchgeführt, bis sie von den Strahlverfahren abgelöst wurden. Sie umfassen die Reinigung mit Säuren und mit Alkalien und die Reinigung mit speziellen Chemikalien. Die Chemikalien werden dabei in flüssiger Form oder als Pasten eingesetzt. Eine umfassende Aufstellung der verwendeten Materialien findet sich bei Auras et.al.[97]

[95] WTA in Bautenschutz und Bausanierung 1992, S. 99.
[96] Meyer 1987, S. 30 f.
[97] Auras et.al. 1997, S. 692ff.

3. Behandlung bauschädlicher Salze

Die Behandlung bauschädlicher Salze stellt einen Sonderfall innerhalb der klassischen Reinigungsmethoden dar. Dabei beschränkt sich die Behandlung durch die o.g. Methoden meist ausschließlich auf die Oberfläche, während Salze sich, im Gegensatz zu Krusten, auf den gesamten Baukörper und damit auch ins Tiefenprofil erstrecken. Irreführend wird meist von so genannten „Entsalzungsmethoden“ gesprochen, obwohl es sich doch stets nur um eine Salzverminderung handeln kann. Folgende Behandlungsmethoden sind derzeit in Gebrauch:

3.1) Trockene mechanische Verfahren

Bei der trockenen mechanischen Entfernung von Salzen handelt es sich zweifellos um die einfachste und kostengünstigste Methode[98]. Mit einem Pinsel oder weichen Bürsten wird der auf dem Objekt befindliche Salzrasen abgebürstet. Damit einhergehend erfolgt auch eine Reinigung von anderen aufliegenden Schmutzpartikeln. Unter Umständen kann mithilfe von Vorbehandlungen das Auftreten von Ausblühungen gefördert werden, damit anschließend eine trockene Salzreduktion durchgeführt werden kann[99]. Die ausgeblühten Salze stellen keine Substanzschädigung, sondern ausschließlich eine ästhetische Beeinträchtigung dar. Dennoch sollten sie entfernt werden, da sie durch Wassereintrag erneut in Lösung gebracht und in den Stein einwandern können[100].
Die oft in Krusten eingebundenen und im Gefüge auskristallisierenden Salze können mit dieser Methode nicht entfernt werden.

3.2) Chemische Salzumwandlung

Die chemische Salzumwandlung bewirkt eine Immobilisierung der Salze vor Ort. Sie bedeutet eine Umwandlung löslicher in schwerlösliche Salze. Da diese keinen Lösungs-, Fällungs- oder Hydratationsprozessen unterliegen, müssen sie nicht entfernt werden und können im Stein verbleiben[101].
Die am häufigsten angewandte chemische Salzumwandlung ist die so genannte “Ammoniumcarbonat- Methode“, bei der in einer Zwei- Phasen- Reaktion das bauschädliche Salz Gips mithilfe des Ammoniumcarbonats zunächst in Calciumcarbonat und Ammoniumsulfat sowie Wasser umgewandelt und anschließend durch Zugabe von Bariumhydroxid in das unlösliche Bariumsulfat und das wenig lösliche Calciumhydroxid überführt wird[102]. Auch Ionenaustauscher werden vermehrt eingesetzt[103].

[98] Arendt/Seele 2000, S. 85.
[99] Verges-Bermin 2003, S. 124.
[100] Auras et.al. 1997, S.700.
[101] Auras et.al. 1997, S.695, Arendt/Seele 2000, S. 86.
[102] Matteini 2003, S. 176f.

3.3) Physikalische Salzreduzierung

Zu den physikalischen Verfahren zählen Kompressen, Opfer- und Sanierputze, Kompressenputze sowie verschiedene Verfahren des Salzausspülens und die elektro-physikalische Salzreduzierung[104]. Meist wird die physikalische Salzreduzierung mit chemischen Methoden kombiniert. Die Mehrzahl der physikalischen Methoden der Salzverminderung können nur leichtlösliche Salze aus dem Gestein entfernen. Schwerlösliche Salze werden nicht erfasst.

3.3.a) Entsalzung mit Kompressen

Die Kompressenentsalzung ist die am weitesten verbreitete Methode der Salzreduktion an Natursteinobjekten. Dabei kommen sowohl dauernasse als auch trocknende Kompressen zum Einsatz[105].

Die dauerfeuchte Kompresse funktioniert annähernd wie die Entsalzung im Wasserbad[106]. Dabei stellt sich mit der Zeit ein Konzentrationsausgleich zwischen der Kompresse und den im Steingefüge gelöst vorliegenden Salzen, die, dem Ionenkonzentrationsgefälle folgend, in die Kompresse einwandern, ein[107].

Eine nasse Kompresse aus saugfähigem Material wird auf die versalzene, vorher durchfeuchtete Oberfläche so aufgebracht, dass ein durchgehender Kontakt gewährleistet ist. Die Feuchtigkeit dringt in den Stein ein und löst die Salze. Lässt die Feuchtigkeit der Kompresse nach einer gewissen Zeit nach, so ändert sich die Richtung des Kapillarstromes: die Salze wandern mit dem Wasser in Richtung Kompresse und kristallisieren dort aus. Die Salze können dann mit der Kompresse abgenommen werden. Der Vorgang sollte mehrfach wiederholt werden[108].

Welcher der beiden Transportmechanismen, Kapillarsog oder Ionenkonzentrationsgefälle, im konkreten Anwendungsfall effektiver ist, ist umstritten.

3.3.b) Sanierputze und Opferputze

Um kleinflächige und teure Kompressen zu vermeiden, können auch sogenannte Opfer- oder Kompressenputze großflächig auf die Oberfläche aufgebracht werden. Diese zeichnen sich durch besondere Saugfähigkeit aus und sind nach entsprechender Standzeit wieder zu entfernen. Ziel der Maßnahme ist nicht die Entsalzung des Mauerwerks, sondern das Fernhalten der Feuchtigkeit und der Salze von der Putzoberfläche, ohne dass eine

---

[103] Grell 1997, S. 81.
[104] Arendt/Seele 2000, S. 87.
[105] Verges-Bermin 2003, S. 122.
[106] S. 3.3.c Entsalzung im Wasserbad, S.25.
[107] Auras et.al. 1997, S. 697.
[108] Auras et.al. 1997, S. 697.

Feuchtesperre angelegt wird[109]. Der Verdunstungshorizont wird durch die zusätzliche Opferschicht, in der sich die Salze anlagern und auskristallisieren, verschoben. Der Sanier- oder Opferputz wird später einschließlich der in ihm gebundenen Salze entfernt.
Voraussetzung für diese Methode ist, dass der Salznachschub aus dem Untergrund gestoppt wird. Dies setzt in der Regel eine funktionierende Trockenlegungsmaßnahme voraus. Opfer- und Kompressenputze müssen einen hohen Anteil kapillar wirksamer Poren, keine oder nur geringe porenhydrophobe Einstellung, Verwendung eines salzresistenten Bindemittels sowie geringe Endfestigkeit aufweisen[110].

3.3.c) Entsalzung im Wasserbad

Die Entsalzung im Wasserbad wird vor allem in der Museumsrestaurierung eingesetzt und beschränkt sich auf kleine, bewegliche Objekte. Dabei wird das Konzentrationsgefälle des Salzgehaltes zwischen Objekt und umgebenden Wasser ausgenutzt. Das Objekt wird von Wasser umgeben, so dass eine vollständige Sättigung innerhalb des Porenraumes erreicht werden kann[111]. Die im Stein befindlichen Salze gehen in Lösung und können in Ionenform, dem Ionenkonzentrationsgefälle folgend, in das Wasser diffundieren[112]. Das Wasser muss dazu regelmäßig erneuert werden. Die Methode wird meist als effektiver als die klassischen Kompressenmethoden eingestuft[113], birgt aber ein erhebliches Risiko für Objekte mit vorgeschädigter Oberfläche, da hier starke Sprengdrücke entstehen können oder tonhaltige Materialien ausgewaschen werden.

3.3.d) Entsalzung durch Elektromigration

Die Salzreduzierung durch Elektromigration wird in der Literatur sehr kontrovers diskutiert. Sie beruht auf Transportvorgängen von gelösten, geladenen Teilchen unter dem Einfluss elektrischer Felder. Durch Installationen von Elektrodensystemen und Anlegen von Gleichspannungen können solche Bewegungen induziert werden. Grundvoraussetzung ist eine entsprechend hohe Feuchtigkeit im Baustoff, da nur so die Transportvorgänge ablaufen können[114].
Das Verfahren erfordert erhebliche Eingriffe in die Substanz, weil die Elektroden im Mauerwerk installiert werden müssen. Meist laufen die Maßnahmen über längere Zeiträume, so dass es weiterhin dauerhaft zu einer ästhetischen Beeinträchtigung kommt. An Natursteinmauerwerk sind die Verfahren der Elektromigration nur in Ausnahmefällen

[109] Auras et.al. 1997, S. 698.
[110] Arend/Seele 2000, S. 88.
[111] Verges-Bermin 2003, S. 122.
[112] Auras et.al. 1997, S. 697.
[113] Windsheimer et.al. 1991.
[114] Auras et.al. 1997, S. 699.

einsetzbar, weil durch die Installation der Anlagen unverhältnismäßige Substanzschäden entstehen.

3.3.e) Einstellung von Klimakonstanten

Weiterhin können Salzschäden durch die Einstellung von Klimakonstanten erheblich gebremst werden. Dabei wird durch Festlegung der Umgebungsklimate erheblicher Einfluss auf die Dynamik der Salze genommen[115], ein Auskristallisieren und Hydratstufenwechsel können so unterbunden werden. Der Einsatz setzt die Kenntnis über die im Stein enthaltenen Schadsalze und deren Hydratstufenwechsel voraus. Problematisch kann sich das Vorhandensein mehrerer bauschädlicher Salze auswirken.
Diese Methode ist in der Regel nur in Innenräumen durchführbar und mit einer guten technischen Ausstattung verbunden.

3.3.f) Mikrowellen

Ebenfalls eine neue Methode, die sich derzeit noch nicht durchgesetzt hat, ist die Salzreduzierung mit Mikrowellen. Der Dampf, der sich durch die Bestrahlung mit Mikrowellen innerhalb des Steines bildet, treibt das Salz in die Lösung außerhalb[116]. Notwendig ist eine hohe Stein- Permeabilität, auch wenn die Porosität relativ gering ist. Nachteilig auf diese Methode wirken sich die hohen Temperaturen von 100°C aus, die bei einigen Materialien zu Folgeschäden führen dürften. Die Methode ist noch in der Entwicklung.

4. Restaurierungspraxis

Salzschäden werden in der restauratorischen Praxis abhängig vom Schadensgrad und in Abstimmung mit der Denkmalpflege mechanisch oder physiko- chemisch behandelt. Für die Reduzierung von Gipskrusten wird meist eine Kombination aus physikalischer und chemischer Reduzierung eingesetzt[117]. Es handelt sich dabei um einen Kompressenauftrag einer gesättigten Ammoniumcarbonat- Lösung, durch deren Reaktion mit dem Schadsalz Gips das schwerlösliche Salz Calciumcarbonat sowie das weiter zu bearbeitende Salz Ammoniumsulfat entstehen sollen.

$$\underset{\text{Gips}}{CaSO_4 \cdot H_2O} + \underset{\text{Ammoniumcarbonat}}{(NH_4)_2CO_3} \rightarrow \underset{\text{Calciumcarbonat}}{CaCO_3\downarrow} + \underset{\text{Ammoniumsulfat}}{(NH_4)_2SO_4} + \underset{\text{Wasser}}{2H_2O}$$

Das wenig lösliche Schadsalz Gips reagiert mit dem löslichen Ammoniumcarbonat zu dem unlöslichen Calciumcarbonat und löslichem Ammoniumsulfat sowie Wasser.

[115] Auras et.al. 1997, S. 699.
[116] Verges-Belmin 2003, S. 131.
[117] Matteini 2003, S. 176, Riedel 2003, S. 187, Leitner 2003, S. 197.

In einem zweiten Schritt, der sogenannten „Passivierung“, wird das Ammoniumsulfat gebunden gemäß der Gleichung:

$$\underset{\text{Bariumhydroxid}}{Ba(OH)_2} + \underset{\text{Ammoniumsulfat}}{(NH_4)_2SO_4} \rightarrow \underset{\text{Bariumsulfat}}{BaSO_4} + \underset{\text{Ammoniak}}{2\,NH_3} + \underset{\text{Wasser}}{2H_2O}$$

Es entsteht unlösliches Bariumsulfat sowie gasförmiger Ammoniak und Wasser.
In der Folge reagiert Bariumhydroxid unter atmosphärischem Einfluss mit Kohlendioxid aus der Luft zu schwerlöslichem Bariumcarbonat, welches aufgrund der engen Verwandtschaft einen festigenden Einfluss auf das Gefüge hat[118].

$$\underset{\text{Bariumhydroxid}}{Ba(OH)_2} + \underset{\text{Kohlendioxid}}{CO_2} \rightarrow \underset{\text{Bariumcarbonat}}{BaCO_3} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O}$$

Die Methode zeigt gute Erfolge und ist derzeit am meisten verbreitet. Gefahren bestehen bei der Anwesenheit von Nitraten, da hier Bariumnitrat entstehen könnte, das dazu neigt, auszukristallisieren und damit die Oberflächen erheblich zu verändern. Auch können anwesende Kupfersalze Verfärbungen durch farbige Komplexsalze verursachen[119]. Die Behandlung mit Ammoniumcarbonat kann evtl. zu einer verstärkten mikrobiellen Besiedlung führen. Deshalb sollte auf diesen Oberflächen möglichst kein frei verfügbares Wasser vorhanden sein[120].
Zu berücksichtigen ist auch, dass bei der Umwandlung eines bauschädlichen Salzes wie Gips in ein weniger schädliches wie Calciumcarbonat die Verdichtung des Steingefüges nicht nachhaltig reduziert wird. Es wird lediglich ein „porenverschließendes“ Material durch ein anderes ausgetauscht, das sich jedoch durch eine sehr viel geringere Löslichkeit und Molekülgröße auszeichnet. Auf längere Sicht scheint auch diese Methode keine Ideallösung zu sein. Eine ausführliche Bewertung der Ammoniumcarbonat- Methode wird bei Matteini[121] und Grell[122] gegeben.

5. Zusammenfassung des 1. Teils

Für die Reinigung und Salzverminderung an Natursteinoberflächen stehen zahlreiche verschiedene Methoden zu Verfügung, die jedoch insgesamt nicht vollständig überzeugen können.
Die trockenen mechanischen Reinigungsverfahren können aufliegende Krusten weitgehend rückstandsfrei von den Oberflächen entfernen, allerdings werden Salze in tieferen Steinlagen nicht erfasst. Mit der trockenen Reinigung ist meist eine Veränderung der Steinoberflächen

[118] Grell 1997, S. 78.
[119] Matteini 1994, S. 9, Skoulikidis 1984, S. 197.
[120] Bock et.al. 1992, S. 82.
[121] Matteini 2003, S. 176.
[122] Grell 1997, S. 75ff.

verbunden, die aus restaurierungsethischer und –ästhetischer Sicht nicht wünschenswert erscheint.
Mit der nassen Reinigung ist ein hoher Wassereintrag verbunden. Salze in tieferen Gesteinslagen können mit diesen Methoden zwar erfasst werden, es kann aber auch zu einer Aktivierung und Mobilisierung von Schadsalzen kommen, die erst durch den Wassereintrag Schadenspotential entwickeln. Darüber hinaus werden möglicherweise Angriffsflächen für Mikroorganismen geschaffen, so dass durch diese Reinigungsmaßnahmen zwar aufliegende Schmutzlagen entfernen, aber neue Risikofaktoren eingebracht werden.
Chemische Reinigungsverfahren kommen heute nur noch eingeschränkt zur Umsetzung, da Begleiterscheinungen und Spätfolgen oft nicht steuerbar sind.
Auch die derzeit am häufigsten eingesetzte Salzverminderung mit Ammoniumcarbonat liefert keine Ideallösung, da die Endprodukte der ablaufenden chemischen Umwandlung ebenfalls zu einer Steinverdichtung führen und damit die natürlichen Parameter des Gesteins nicht wiederhergestellt werden können.

Reinigung und Salzverminderung von Steinoberflächen sind meist untrennbar miteinander verbunden. Sie sollen eine Verbesserung der Gesteinseigenschaften, vor allem eine Öffnung der Poren bewirken. Die ästhetische Verbesserung mit einer Entfernung der Verfärbungen und Verkrustungen ist aus restauratorischer Sicht zweitrangig.
Eine Maßnahme ohne optische Veränderung ist durchaus vertretbar, wenn das Schadsalz fast oder vollständig aus dem Naturstein entfernt werden kann, das „wissenschaftliche“ Ergebnis also den Aufwand der Maßnahme rechtfertigt. Außerdem wird dabei die Ästhetik des Objektes mit gealterter Oberfläche, die auch Verschwärzungen als „Patina“ mit einschließt, am wenigsten beeinflusst.
Die optischen Veränderungen, die durch Krusten entstanden sind, können als ästhetische Beeinträchtigung der Objektaussage meist nur mechanisch entfernt werden. Die damit verbundene Reduzierung von Originalsubstanz sollte so eingeschränkt wie möglich erfolgen. Letztendlich werden die Entscheidungen aus wirtschaftlichen Aspekten gefällt.
Der verhältnismäßig hohe Aufwand, mit dem die meisten Reinigungs- und Salzverminderungsmethoden verbunden sind, führt meist zu einem relativ geringen Reinigungsergebnis, da Schadsalze nie vollständig aus dem Stein entfernt werden können. Oft sind mit Reinigungsmethoden auch erhebliche Risiken für die Steinsubstanz durch Spätfolgen verbunden. Die Suche nach Alternativen zu den derzeit angewandten Methoden ist deshalb unerlässlich.

Teil 2

I. Anzucht und Applikation der Bakterien

1.Einleitung

Neben den physiko- chemischen Schadensprozessen an Kulturgütern aus Naturstein erweckten in den letzten Jahren zunehmend auch biochemische, durch Mikroben bedingte Schadensprozesse das Interesse des Restaurators. Den durch Mikroorganismen verursachten Schäden an Kunstobjekten wird inzwischen eine große Bedeutung zuerkannt[123].

Auf bewitterten Natursteinoberflächen siedeln sich zahlreiche unterschiedliche Mikroorganismen, vor allem Bakterien, Pilze und Algen an[124]. Das Bindemittel des Gesteins und die Porengrößen haben dabei einen Einfluss auf die mikrobielle Besiedlung. Die Mikroorganismen und ihre Stoffwechselprodukte verändern die Objektoberfläche („Biofilm“). Sie schaffen damit möglicherweise die Voraussetzungen für einen weiteren, nicht direkt biogenen Steinzerfall.

Für das Wachstum der Organismen im und am Baumaterial sind verschiedene Faktoren wichtig, vor allem aber Wasser[125]. Da auch Salzschäden vor allem im Zusammenhang mit veränderten Wasserhaushalten im Stein auftreten, ist ein Zusammenhang und mögliches Zusammenwirken von Salzen und Mikroorganismen auf Natursteinoberflächen anzunehmen[126].

Die Behandlung des Schadensbildes „mikrobieller Befall“ verlangt nach neuen Behandlungsmethoden, die für Restauratoren nur in Absprache mit Mikrobiologen erfolgen können. Wünschenswert wäre dabei, die klassischen Schadensursachen wie Salze und die mikrobiell induzierten Schäden in einem Schritt zu behandeln bzw. Methoden zu kombinieren.

2. Problemstellung mikrobielle Salzreduzierung

Zahlreiche Mikroorganismen haben negative Auswirkungen auf Natursteinoberflächen. Das Feld der Mikrobiologie bietet aber möglicherweise auch Lösungen für Problemstellungen, die ohne die mikrobiologischen Tätigkeiten nicht ohne weiteres lösbar erscheinen. Diese positive Wirkung von Organismen wird als „Bioremediation“[127] bezeichnet. Basis dieses Zweiges der Biotechnologie ist die Tatsache, dass es viele Organismen gibt, die in der Lage sind, Giftstoffe und Verunreinigungen zu verwerten, abzubauen oder zu speichern und damit dem

[123] Bock et al. 1989, S. 47, Petersen und Krumbein 1989, S. 57, Krumbein et al. 1990, S. 39, Bock und Fahrig 1991, S. 179, Bock et al. 1992, S. 33, Petersen und Krumbein 1992, S. 49, Krumbein 1991, S. 215, Braams et al. 1993, S. 43, Bock et al. 1993, S.27.
[124] Bock und Fahrig 1991, S. 179.
[125] Willimzig 2003, S. 79.
[126] Vergleiche den Zusammenhang zwischen Salzen und dem Wachstum rosafarbener Bakterien auf Wandoberflächen, Leupold 2006.
[127] Der Begriff leitet sich ab von lat. remedium = Heilmittel.

Ökosystem zu entziehen. Unterschiedliche Mikroorganismen werden in der Altlastensanierung, etwa um ausgelaufenes Öl abzubauen oder Abraumhalden mit radioaktiven Abfällen zu reinigen, eingesetzt[128]. Auch in der Gentechnik werden verschiedene Organismen genutzt.

In den letzten Jahren wurde die Erforschung der Nutzbarkeit von Mikroorganismen auch auf die Behandlung von Schadsalzen in Naturstein- und Putzoberflächen ausgedehnt. Im Rahmen einiger Projekte wurden verschiedene Bakterienarten erfolgreich zur Salzreduzierung genutzt: denitrifizierende Bakterien bewirkten eine Salzreduzierung auf künstlich versalzenem Klinkermaterial ebenso wie auf Naturstein[129]. An der Reduktion von Gipskrusten durch Sulfatverwerter wird ebenfalls erfolgreich gearbeitet[130]. Derzeit befindet sich die Salzreduzierung mit Mikroorganismen noch in der Experimentierphase. Langzeitstudien und -erkenntnisse liegen noch nicht vor[131].

Bei der Verwendung von Mikroorganismen für die Bioremediation an Kunstobjekten ist besonderes Augenmerk auf deren Verhalten am Objekt und, wenn erforderlich, auf eine Nachbehandlung zu legen. So scheint der Einsatz von Bakterien nur da sinnvoll und vertretbar, wo er gesteuert werden kann. Die Mikroorganismen dürfen nur so lange wie nötig aktiv sein, anschließend müssen sie aus den behandelten Bereichen wieder entfernt werden können. Weiterhin dürfen keine negativen Begleiterscheinungen wie schädigende Symbionten oder Säurebildung auftreten. Diese Überlegungen schränken den Einsatz verschiedener Mikroorganismen oft erheblich ein.

In der vorliegenden Arbeit soll die Anwendung sulfatreduzierender Bakterien bei der Behandlung von Gipskrusten sowie ihr Verhalten an und ihre Auswirkungen auf Sandsteinoberflächen aus restauratorischer Sicht untersucht und bewertet werden.

3. Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung des Versuchs

Zunächst galt es, die technischen Voraussetzungen für die Durchführung des Versuches zu schaffen. So sollte ein geeignetes Medium für die Bakterien hergestellt und die Bakterien kultiviert werden. Die Anaerobenkammer, in der die Anzucht unter Stickstoffatmosphäre erfolgen sollte, musste vorbereitet werden. Weiterhin sollten Nachweismöglichkeiten für die Bakterientätigkeiten ermittelt und überprüft werden. Die Vorbereitungen und Laborversuche wurden in der HAWK, FH Hildesheim, Labor für Mikrobiologie durchgeführt.

[128] www.wikipedia.org/wiki/bioremediation.
[129] Venzmer 2005, S. 67ff..
[130] May et. al. 2004, Ranalli et. al. 2000.
[131] Auras et.al 1997.

3.1. Medienherstellung

Das Medium für die zu verwendenden Bakterien Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans und Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris wurde gemäß Katalog des DSMZ (Deutsche Stammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH in Braunschweig) hergestellt.

Die Zusammensetzung des Mediums 63 wird im Katalog der DSMZ wie folgt angegeben:

Medium 63

Lösung A	Lösung B	Lösung C
0,5 g K_2HPO_4	0,5 g $FeSO_4$	0,1 g Na- Thioglycolat
1 g NH_4Cl	10 ml aqua dest.	0,1 g Ascorbinsäure
1 g Na_2SO_4		10 ml aqua dest.
0,1 g $CaCl_2$ x 2 H_2O		
2 g $MgSO_4$		
2 g DL- Na-Lactat		
1 g Hefeextrakt		
0,001 g Resazurin		
980 ml aqua dest.		

Die Bestandteile der jeweiligen Lösungen wurden in den entsprechenden Wassermengen gelöst. Dabei erfolgte die Zugabe jeweils auf einem Rührtisch, um die gleichmäßige Verteilung der Bestandteile in der Lösung zu gewährleisten. Lösung A wurde mit Folie abgedeckt und auf der Heizplatte zum Sieden gebracht.

Die Lösung wurde von der Heizplatte genommen und in verschließbare Flaschen mit Serumdeckel umgefüllt. Anschließend wurden die Flaschen mit Hilfe von durch den Serumdeckel eingeführten Kanülen mit Stickstoff begast, bis die Lösung auf Raumtemperatur abgekühlt war (4 - 6 Stunden, abhängig von der Umgebungstemperatur).

Die Flaschen wurden erneut auf Rührtischen platziert und tropfenweise die Lösungen B und C zugegeben. Nach der Einstellung des pH- Wertes durch Zugabe von NaOH auf 7,8 wurden die Lösungen von den Rührtischen genommen und über Nacht unter Laborbedingungen gelagert. Dabei setzten sich am Flaschenboden Bestandteile des Mediums als grüngräulicher Niederschlag ab. Am nächsten Tag wurde das Medium 15 Minuten bei 121°C autoklaviert. Das Medium wurde dem Autoklaven entnommen und weiterhin unter Laborbedingungen bzw. in der Anaerobenkammer gelagert.

Die Verwendung von in der Literatur aufgeführten Alternativ- Medien[132] blieb aufgrund der erfolgreichen Anzucht der Bakterien in dem vorgegebenen Medium unberücksichtigt.

[132] Atlas. et. al. 2000, S. 149; Kassem 1991, S.35.

3.2. Vorbereiten der Anaerobenkammer

Die Beimpfung des Mediums sowie die Anzucht der Bakterien erfolgten in einer Anaerobenkammer. Diese bestand aus einem Plexiglaskasten, der an einer Schmalseite mit einer abnehmbaren Wand versehen ist. Auf der anderen Schmalseite ist eine so genannte „Schleuse“ angebaut, durch die kleinere Gegenstände in die Kammer eingebracht werden können. Die Kammer ist zusätzlich mit Ab- und Zulaufschläuchen versehen, die eine Begasung ermöglichen. Die Schleuse ist gesondert zu begasen.

Abb. 8 Anaerobenkammer mit Bakterienkulturen im Labor der FH HHG, Herbst 2005

Vor Beginn der Arbeiten wurde die Seitenfront der Anaerobenkammer entfernt und der Innenraum mit Wasser und Ethanol gereinigt. Die Seitenfront wurde wieder aufgesetzt und mit Terostat[133] abgedichtet. Die Anaerobenkammer wurde mit technischem Stickstoff probeweise begast. Damit konnte die Dichtigkeit bestätigt werden. Anschließend wurde die gesamte Kammer für etwa 2 Stunden begast, so dass sich im Innenraum eine weitgehend sauerstofffreie Stickstoffatmosphäre einstellte. Der Versuch, ein Feuerzeug in der Kammer zu zünden, misslang, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass kein Sauerstoff mehr in der Anaerobenkammer enthalten war. Die Nachbegasung der Kammer erfolgte später alle sieben Tage für je 1½ Stunden. Nach jedem Vorgang wurde die Kammer ebenfalls kurzzeitig begast.

[133] Terostat IX Abdichtungsmasse, Henkel- Teroson GmbH.

3.3. Aktivierung der Bakterien

Im Rahmen des BIOBRUSH- Projektes war das sulfatreduzierende Bakterium Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans verwendet worden[134]. Auch Heselmeyer und andere Autoren setzten Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans und Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris für ihre Versuche ein[135].

Die beiden Bakterien- Arten wurden von der Deutschen Sammlung für Mikroorganismen DSMZ in gefriergetrockneter Form bezogen und vor Beginn der Experimente aktiviert.

3.3.a) Sulfatreduzierende Bakterien

Sulfatreduzierende Bakterien werden allgemein als „obligat anaerob“ bezeichnet. Sie bevorzugen einen pH- Wert von etwa 7[136] und wachsen nur bei einem Redoxpotential von weniger als -100mV[137]. Sie werden in zwei Gruppen unterteilt:

1. die unvollständigen Oxidierer, die Wasserstoff verwerten und organische Substrate nur unvollständig bis zum Acetat umsetzen und
2. die vollständigen Oxidierer, die Acetat vollständig oxidieren[138].

Die Sulfatreduzierer führen eine anaerobe Atmung mit molekularem Wasserstoff oder organischen Substraten als Elektronendonatoren und Sulfat als terminalem Elektronenakzeptor durch[139].

Die Reduktion von Sulfat zu Sulfid verläuft dabei in drei Schritten[140]:

$$\mathbf{SO_4^{2-} + ATP \rightarrow APS + PP_i}$$
$$\mathbf{APS + 2e^- \rightarrow SO_3^{2-} + AMP}$$
$$\mathbf{SO_3^{2-} + 6e^- + 8\ H^+ \rightarrow H_2S + 3\ H_2O}$$

[ATP= Adenosin- Triphosphat
APS= Adenosin – 5- Phosphosulfat
PP_i= Pyrophosphat
AMP= Adenosin- Monophosphat]

Die Aktivierung des Sulfats erfolgt mit Hilfe des Enzyms ATP- Sulfurylase. Für den Ablauf dieser Reaktion in Richtung APS- Bildung ist es notwendig, das anorganische Pyrophosphat (PP_i) durch eine Pyrophosphatase zu entfernen. Im weiteren Verlauf der Sulfatreduktion wird das gebildete APS mittels APS- Reduktase zu Sulfit reduziert. Sulfit wiederum wird in einem 6- Elektronen- Schritt durch das Enzym Sulfit- Reduktase weiter zu Sulfid reduziert[141]. Es ist

[134] May et al. ohne Datum, S. 754.
[135] Heselmeyer 1990, S. 12, Atlas et al., 1988, S. 149; Ranalli et. Al. 2000, S. 232.
[136] Widdel 1988, Heselmeyer 1990, S. 95.
[137] Widdel 1988, Heselmeyer 1990, S. 11.
[138] Cypionka 2002, S. 209.
[139] Heselmeyer 1990, S. 7, Wieringa 2000, S. 2, Krekeler 1997, S. 1.
[140] Trüper 1984, Cypionka 2002, S. 177, Heselmeyer 1990, S. 7.
[141] Heselmeyer 1990 S. 7.

bis heute nicht klar, ob dabei 6 Elektronen direkt übertragen werden oder ob weitere Zwischenstufen und Enzyme beteiligt sind. Die Reduktasen scheinen löslich im Cytoplasma vorzuliegen oder nur lockere Wechselwirkungen mit der Membran zu unterhalten[142]. Im Rahmen eines in Italien laufenden Versuches ist derzeit geplant, die Enzyme, die für die Sulfatreduktion verantwortlich sind, aus den Bakterien zu isolieren[143].
Anstelle von Sulfaten können auch andere Schwefelverbindungen wie Sulfit und Thiosulfat aber auch Tetrathionat und elementarer Schwefel durch die Bakterien reduziert werden[144].
Viele sulfatreduzierende Bakterien besitzen Katalase und Superoxid- Dismutase und sind damit in der Lage, bis zu 72 h unter Sauerstoffeinfluss zu überleben[145]. Verschiedene Sulfatreduzierer weisen zudem die Fähigkeit zur aeroben Atmung auf, bei der ATP synthetisiert werden konnte[146]. Als Substrate werden dafür organische Substrate, vor allem Gärungsprodukte wie H_2, Acetat, Ethanol, Lactat, Propionat, Butyrat etc., nicht aber komplexere Substrate wie Zucker, und reduzierte Schwefelverbindungen genutzt. Sind verschiedene Elektronenakzeptoren vorhanden, so wird von den Sulfatreduzierern erst Sauerstoff veratmet, bevor wieder Sulfat oder andere Schwefelverbindungen als Elektronenakzeptoren genutzt werden[147]. Die Sauerstoffatmung scheint das Wachstum jedoch vollständig zu hemmen.
Die Sulfatreduzierer sind gut angepasst an das Zusammenleben mit Gärern und fördern in so genannten „syntrophen Beziehungen“ deren Wachstum dadurch, dass sie überschüssigen Wasserstoff verbrauchen[148].

3.3.b) Geschichte und Vorkommen der sulfatreduzierenden Bakterien

Die Bildung von Sulfid aus Sulfat wurde bereits in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts als biologischer Prozess erkannt, allerdings ging man davon aus, dass die Reaktion durch Algen katalysiert wird. Mit der Isolierung der ersten Reinkultur eines sulfatreduzierenden Bakteriums 1895 wurde bekannt, dass die Sulfatreduktion von Bakterien katalysiert wird[149].
Sulfatreduzierende Bakterien kommen in anaeroben aquatischen und terrestrischen Habitaten vor. Sie wurden in Sedimenten, Gewässern, Böden, Bioreaktoren, Biofilmen, Ölfeldern, Verdauungstrakten und sogar in der Mundhöhle nachgewiesen[150]. Das Vorkommen Sulfatreduzierer kann aber nicht als Indikator anaerober Bedingungen im Boden gewertet werden, da sie neben Clostridien und Methanogenen auch in aeroben Böden

[142] Cypionka 2002, S. 178.
[143] Ranalli et.al. 2000, S. 153.
[144] Krekeler 1997, S. 1, Heselmeyer 1990, S. 8.
[145] Hewitt und Morris 1975, Hatchikian et.al. 1977, Hardy und Hamilton 1981.
[146] Dilling und Cypionka 1990, Sass 1997, S. 4.
[147] Krekeler und Cypionka 1995, Krekeler 1997 S. 3, Sass 1997, S. 4.
[148] Cypionka 2002, S. 175.
[149] Beijerinck 1895, Sass 1997, S. 3.
[150] Ranalli et. al. 2000, S.234, Krekeler 1997, S. 7, Heselmeyer 1990, S. 11.

überleben können[151]. Es sind psychrophile, mesophile, thermophile und halophile Stämme bekannt. Der Sauerstoff zählt dabei zu den Faktoren, die den Lebensraum dieser Bakterien einschränken. Dennoch ist das Vorkommen sulfatreduzierender Bakterien nicht nur auf sauerstofffreie Standorte beschränkt, sondern sie kommen auch in Sauerstoff- Milieus wie z.B. Cyanobakterienmatten und Termitendärmen in hoher Zahl vor[152].
In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Stämme sulfatreduzierende Bakterien der Gattung Desulfovibrio verwendet.

3.3.c) Desulfovibrio- Arten

Desulfovibrio- Arten sind heterotroph, sie besitzen die Fähigkeit, neben der Sulfatreduktion auch Nitratammonifikation zu betreiben, also die Reduktion von Nitrat zu Ammonium[153]. Sie zeichnen sich weiter dadurch aus, dass sie eine unvollständige Oxidation von Lactat zu Acetat durchführen. Diese Acetat- Bildung ermöglicht ATP- Konservierung über einen Weg, der typisch für Gärer ist[154]. Über 30 Desulfovibrio- Arten sind beschrieben[155]. Die Zellen zeigen im Mittel einen Durchmesser von 0,7 µm und verhalten sich gram- negativ.
Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden Bakterien der Stämme Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans eingesetzt.

Bei dem sulfatreduzierenden Bakterium Desulfovibrio vulgaris handelt es sich um ein als „obligat anaerob“ bekanntes Bakterium. Es ist gram- negativ und zeigt keine Sporenbildung. Der vibrio- förmige Organismus ist 0,5 bis 0,8 µm breit und 1,5 bis 4 µm lang. Er ist monotrich begeißelt und daher beweglich[156]. Desulfovibrio vulgaris oxidiert organische Substrate unvollständig zu Acetat und CO_2. Der Organismus verwertet Lactat und Sulfat wie folgt[157]:

$$2\ CH_3CHOHCOO^- + SO_4^{2-} \rightarrow 2\ CH_3COO^- + 2\ HCO_3 + HS^- + H^+$$

Desulfovibrio vulgaris kann auch durch Pyruvat- Fermentation seinen Erhaltungsstoffwechsel bestreiten, wenn im Medium kein Sulfat zur Verfügung steht. Nach dreistündiger Einwirkung von Luftsauerstoff zeigte der Organismus keine Wachstumsveränderungen, was vermutlich auf Sauerstoff- entgiftende Enzyme wie Superoxid- Dismutase, Katalase und Peroxidase zurückzuführen ist[158].

[151] Gauri et. al. 1981 S. 136.
[152] Krekeler 1997, S. 7, Wieringa 2000, S. 3.
[153] Keith und Herbert 1983, Mc Cready et al. 1983, Mitchell et al. 1986, Seitz und Cypionka 1986, Heselmeyer 1990, S. 10.
[154] Cypionka 2002, S. 176.
[155] Wieringa 2000, S. 5.
[156] Schlegel 1985, S. 308.
[157] Heselmeyer 1990, S. 10.
[158] Heselmeyer 1990, S. 89.

Desulfovibrio desulfuricans ähnelt Desulfovibrio vulgaris. Es handelt sich ebenfalls um ein polar begeißeltes vibrio- förmiges Stäbchen, das keine Sporen entwickelt und sich gram-negativ verhält. Es gilt gleichfalls als obligat anaerob.
Bakterien der Art desulfuricans subsp. desulfuricans enthalten Desulfoviridin als Sulfit-Reduktase und zeigen keine Thermophilie (bevorzugtes Wachstum unterhalb 40°C). Es handelt sich ebenfalls um unvollständige Oxidierer, die neben der Sulfatreduktion auch Wasserstoff, Ethanol und einige organische Säuren verwerten, die zu Acetat oxidiert werden[159]. Aus zahlreichen Versuchen ist die mikrobielle Umwandlung von Gips in Kalk gemäß der Gleichung

$$\mathbf{6\ CaSO_4 + 4H_2O + 6\ CO_2 \rightarrow 6\ CaCO_3 + 4\ H_2S + 2\ S + 11\ O_2}$$

bekannt[160]. Der Unterschied zu Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris besteht in dem fehlenden Wachstum mit Pyruvat und Malat, während beide Organismen auf Formiat wachsen[161].

3.3.d) Durchführung

Die von der DSMZ bezogenen Bakterien wurden gefriergetrocknet in Ampullen geliefert. Die Ampullen mit den gefriergetrockneten Bakterien, eine Pinzette, eine Pasteurpipette sowie ein Glasschneider und vier Erlenmeyerkolben wurden durch die Schleuse in die Anaerobenkammer überführt. In der Anaerobenkammer wurde die äußere Glasampulle der gefriergetrockneten Kultur der sulfatreduzierenden Bakterien Desulfovibrio desulfuricans (DSMZ- Bezeichnung 642) gemäß der Anleitung des DSMZ vorsichtig mit dem Glasschneider aufgeschnitten und das Isoliermaterial mit der Pinzette entnommen. Aus der inneren Ampulle, die nur an einem Ende zugeschweißt, am anderen mit einem Stopfen verschlossen ist, wurde der Stopfen entfernt. Mit der Pipette wurde etwa 1 ml des Mediums 63 aus einem der Erlenmeyerkolben entnommen und in die Ampulle gegeben. Anschließend wurde der Stopfen mit der Pinzette wieder aufgesetzt und die Ampulle aufrecht für etwa 30 min abgestellt, damit die Bakterien zu quellen beginnen. Mit der Ampulle mit der Desulfovibrio vulgaris- Kultur (DSMZ- Bezeichnung 644) wurde entsprechend verfahren.

[159] Cypionka 2002, S. 269.
[160] Atlas et. al. 1988, S. 151.
[161] Schlegel 1985, S. 308.

Nach 30 Minuten wurden die Ampullen vorsichtig geschüttelt, damit sich die Bakterien gleichmäßig in der Lösung verteilten. Anschließend wurden die Keimsuspensionen gleichmäßig auf die mit jeweils 30 ml Medium gefüllten Erlenmeyerkolben verteilt. Diese wurden ebenfalls vorsichtig geschüttelt und mit einem Aluminiumfoliendeckel abgedeckt. Die Kulturen (Stammlösungen) wurden über das Wochenende in der Anaerobenkammer belassen. Die Ansätze in den Erlenmeyerkolben zeigten nach wenigen Tagen eine charakteristische Trübung, die sich innerhalb der nächsten Tage weiter verstärkte bis hin zu einer dichten schwarzen Flüssigkeit. Nach 4 Tagen erfolgte der erste Aktivitätsnachweis.

3.4. Überprüfung der Lebensfähigkeit / Vitalität

Zur Überprüfung der Lebensfähigkeit / Vitalität der Bakterien wurden in regelmäßigen Abständen den mit Medium gefüllten beimpften Erlenmeyerkolben jeweils einige Tropfen der aufgeschüttelten Keimsuspension entnommen, in kleine Greiner- Röhrchen überführt und aus der Kammer ausgeschleust. Dabei konnte stets starker H_2S- Geruch wahrgenommen werden, der die Vitalität der Bakterien unterstrich.

Aus jedem der Gefäße wurde ein Tropfen des beimpften Mediums entnommen und auf einem Objektträger platziert. Dieser wurde mit etwa der gleichen Menge Baclight versehen. Baclight ist ein Farbstoff, der in der Lage ist, lebendige und tote Bakterien unterschiedlich anzufärben und dies unter UV- Licht aufzuzeigen[162]. Dabei zeigen die vitalen Organismen grüne, die bereits abgestorbenen eine rote Fluoreszenz. Die Proben wurden am Durchlichtmikroskop[163] untersucht und bewertet. Alle folgenden Aktivitätsnachweise erfolgten entsprechend bei gleicher Vergrößerung[164].

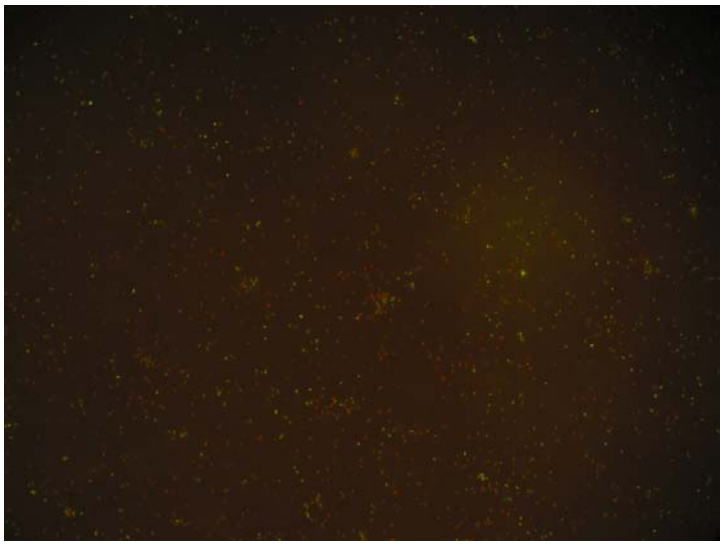


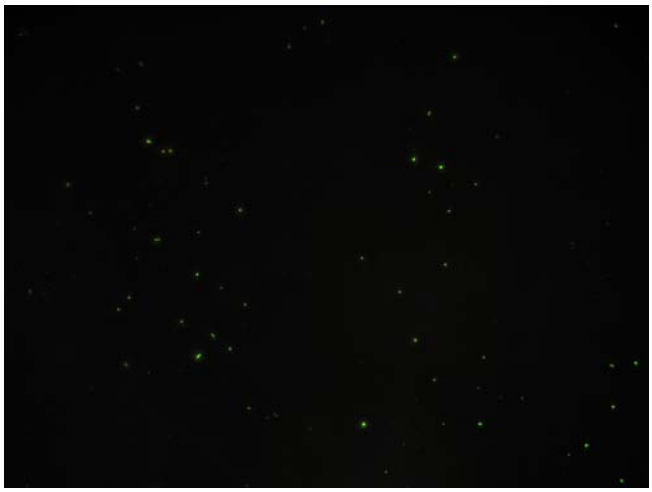
Abb. 9 grüne und rote Bakterienfluoreszenz

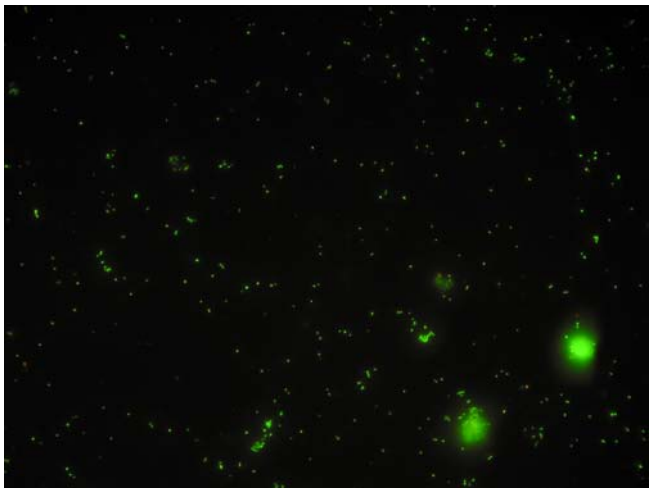
[162] Molecular Probes, LIFE/DEAD Baclight Bacterial Viability Kits, Product Information, Internet. S. Anhang, Datenblatt.
[163] Zeiss Filtersatz 09, excitation BP 450-490, beamsplitter FT 510, emission LP 515, 400fache Vergrößerung, gilt für alle folgenden Untersuchungen soweit nicht anders vermerkt.
[164] s. Anhang, Tabelle 2, Bewertung der Bakterienvitalität und -aktivität.

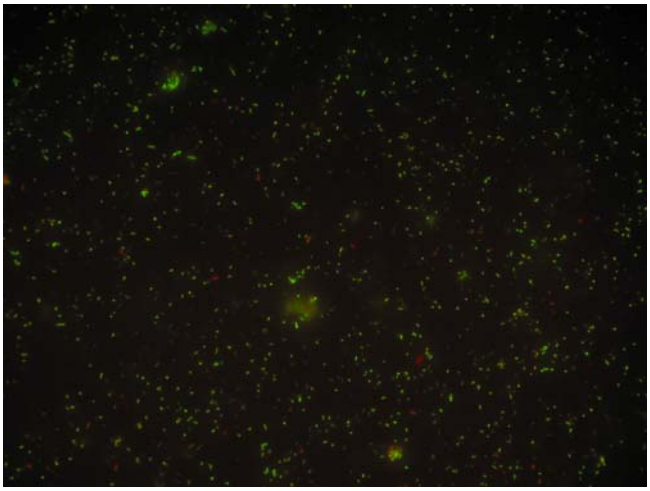
Die Aktivitätsnachweise an den beimpften Medien zeigten deutlich stäbchenförmige Bakterien, die mit Baclight unter UV- Licht stark fluoreszierten. Dabei überwog bei den Stammkulturen stets der Anteil an grünen und damit lebendigen Bakterien. Die Zelldichte stieg dabei mit dem Alter der Kulturen. Weiterhin zeichneten sich die Bakterien beider Desulfovibrio- Arten durch starke Bewegung aus.
So wurden für alle folgenden Anzuchten als Kriterien für die Bewertung der Kulturen die Zelldichte, der Anteil an beweglichen Bakterien (Aktivität) sowie der Anteil an grün fluoreszierenden Zellen (Vitalität) definiert. Eine Auszählung der Bakterien konnte aufgrund der Anzahl an Beprobungen nicht erfolgen. Die Zelldichte, der Anteil an grün fluoreszierenden Zellen sowie die Beweglichkeit wurden geschätzt.

Die Bakterien der beiden Stammkulturen wuchsen gut in dem selbst hergestellten Medium an und zeigten bereits nach 2 Wochen hohe Zellzahlen[165].
Nach ca. 5 bis 20 Tagen wurde frisch hergestelltes Medium mit den angezogenen Kulturen angeimpft[166]. Dabei wurden sterilisierte Erlenmeyerkolben jeweils mit 30 ml Medium gefüllt und mit etwa 1 ml Kultur angeimpft. Die Kulturen konnten auf diese Art und Weise über 6 Monate am Leben erhalten werden.
Um den optimalen Zeitpunkt für die Überimpfung zu ermitteln, wurden in verschiedenen Voruntersuchungen die Zelldichte, Beweglichkeit und Anteil an grün fluoreszierenden Zellen über die ersten 7 Tage nach Animpfung täglich überprüft.
Desulfovibrio vulgaris entwickelte bereits nach drei bis sechs Tagen extrem hohe Zelldichten mit einem großen Anteil an lebenden Bakterien. Danach sank der Anteil an lebenden Bakterien. Nach sechs Wochen waren fast alle Bakterien abgestorben.
Desulfovibrio desulfuricans dagegen entwickelte sich in zahlreichen Anzuchten deutlich langsamer und zeigten meist erst nach drei bis vier Wochen hohe Zelldichten mit überwiegend grün fluoreszierenden Bakterien. Auch nach sechs Wochen erschienen die Zelldichte und der Anteil an lebendigen Zellen unverändert hoch.
Die Kriterien der Zelldichte, Beweglichkeit und des Anteils an grün fluoreszierenden Zellen bildeten die Grundlage für die Wahl des Zeitpunktes der Überimpfung. Ziel war dabei, einen möglichst hohen Anteil lebender beweglicher Bakterien zu erhalten.

[165] s. Anhang, Tabelle 2, Bewertung der Bakterienvitalität und -aktivität.
[166] s. Anhang, Tabelle 1, Überimpfung der Kulturen.







3.5. Ergebnis

Die Ergebnisse der an einzelnen Überimpfungen durchgeführten Aktivitätsnachweise sind nicht auf alle Kulturen übertragbar. Einzelne Kulturen der Vulgaris- Art zeigten auch nach zwei Monaten noch hohe Zelldichten mit überwiegend lebendigen Zellen. Ebenso zeigten auch Desulfuricans- Anzuchten bereits nach zwei Tagen hohe Zellzahlen. So erfolgte das Überimpfungen in Abständen von zwei bis zehn Tagen.

Durch verschiedene Untersuchungen konnte ermittelt werden, dass die Bakterien je nach Medium und evtl. auch abhängig von Außentemperatur und Luftfeuchte unterschiedlich starkes Wachstum in verschiedenen Zeitspannen zeigten. Eine Kontinuität war nicht erkennbar[167].

Abb. 10 - 12
Zunahme der Zelldichte von gering (Abb. 10) über mittel mit leichter Klumpenbildung (Abb. 11) bis extrem hoch (Abb. 12).

[167] s. Anhang Tabellen 1 + 2.

4. Überprüfung der Kulturen auf Begleitorganismen

Trotz weitgehend sterilen Arbeitens konnten in den Kulturen immer wieder Organismen beobachtet werden, die sich optisch von den stäbchenförmigen Desulfovibrio- Arten unterschieden. Sie erschienen eher rund bis oval und bildeten teilweise Ketten, was bei den Bakterien in Reinkulturen nicht beobachtet werden konnte. Andere lagerten sich in Vierergruppen aneinander. Diese Kontaminationen konnten in verschiedenen Kulturen von Desulfovibrio vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans beobachtet werden, traten aber nicht in allen Kulturen und nicht kontinuierlich auf.
Es konnte nicht ermittelt werden, wie es zu den Kontaminationen kam: Möglich wäre ein Transport auf den sterilisierten Glasgefäßen in die Kammer. Weiterhin könnten die Bakterien auch erst außerhalb der Kammer in die Erlenmeyer- Kolben gelangt sein.

Die beiden verwendeten Desulfovibrio- Arten sind gram- negativ[168]. Anhand verschiedener Nachweismethoden sollte ermittelt werden, ob es sich bei den Begleitorganismen eventuell um eine fremde, durch Gram- Färbung unterscheid- und identifizierbare Art handelt.

4.1. Vorbereitung

Für die Überprüfung der Reinheit wurden Tropfen der Bakteriensuspensionen Desulfovibrio desulfuricans supsp. desulfuricans (etwa 2 Wochen alt) und Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris (etwa 6 Wochen alt), die optisch unterschiedliche Bakterien zeigten, auf jeweils einen Nutrient- und einen Chinablau- Nährboden gegeben und gleichmäßig mit dem Drigalskispatel verteilt. Nach einem Tag wurden kleine Proben der Kulturen in aqua- dest. Tropfen auf Objektträgern gelöst und im Mikroskop betrachtet.
Beide Kulturen zeigten auf beiden Nährböden extrem hohe Zelldichten mit intensiver Bewegung. Die Ausstriche auf den verschiedenen Nährböden bewiesen, dass die als „obligat anaerob“ bezeichneten Bakterien auch am Luftsauerstoff auf trockenem Medium in der Lage sind, längere Zeitabschnitte zu überleben. Dies ist ein wichtiger Faktor bei der Anwendung am Objekt, da durch die Saugfähigkeit des Steines evtl. ein eher trockenes Milieu innerhalb der Kompressen entstehen kann.
Durch Gramfärbung und einen KOH- Test sollte das Gramverhalten der Bakterien in beiden Kulturen überprüft werden.

[168] Madigan et al. 2002, S. 556.

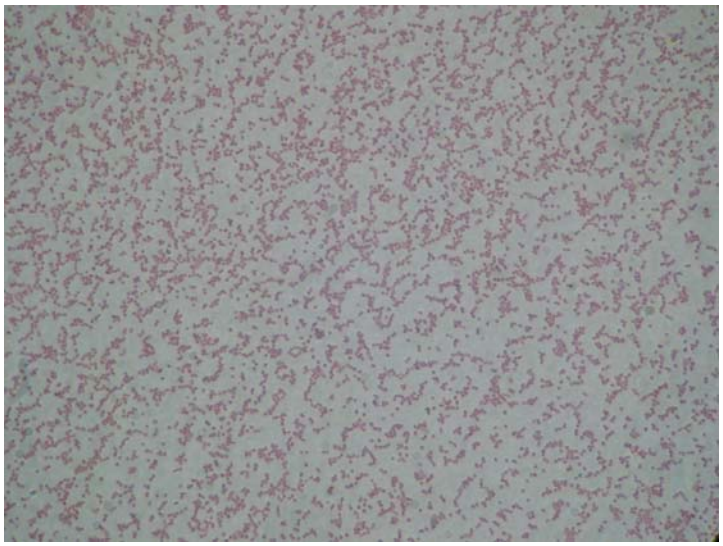
4.2. Unterscheidung gram- positiver und gram- negativer Bakterien

Zwischen den Zellwänden von gram-positiven und gram- negativen Bakterien bestehen Unterschiede im chemischen und ultramorphologischen Aufbau[169]. Das Stützskelett der Bakterienzellwand besteht aus einem Polymer des Peptidoglycans, dem Murein. Gram-negative Bakterien haben eine Zellwand, bei der das Mureinnetz ein- bis zweischichtig ist, während gram- positive Bakterien ein bis zu 40- schichtiges Mureinnetz besitzen.
Gram- positive Bakterien sind im Allgemeinen empfindlich gegen das Enzym Lysozym. Es spaltet die Bindung des Mureins, so dass die Zelle infolge der Veränderung des osmotischen Drucks platzt. Gram- negative Bakterien sind nicht so empfindlich, weil das Lysozym Murein aufgrund einer dicken Lipoid- Schicht auf dem Mureinnetz nicht angreifen kann. Dieses unterschiedliche Verhalten verschiedener Bakterienarten wird auch bei der Gram-Färbung und bei dem KOH- Test ausgenutzt, um verschiedene Arten zu unterscheiden.

4.3. Gram- Färbung[170]

Bei der Gram- Färbung[171] wird die Bakteriensuspension mit einem Triphenylmethanfarbstoff (z.B. Kristallviolett) gefärbt und anschließend mit Jod- Kaliumjodidlösung behandelt. Dabei bildet sich eine intrazelluläre Kristallviolett- Jod- Verbindung. Werden die mit Kristallviolett gefärbten und mit Jod behandelten Präparate mit Ethanol gespült, so behalten gram- positive Mikroorganismen die violettschwarze Farbigkeit, während gram- positive entfärbt werden. Gram- negative Bakterien können anschließend mit Hilfe einer Nachfärbung mit Safranin sichtbar gemacht werden. Sie erscheinen dann hellrot.
Für den Versuch wurden Wassertropfen auf zwei Objektträger gegeben. In diese wurden von beiden Kulturen dünne Abstriche auf Objektträgern hergestellt. Sie trockneten an der Luft und wurden am Bunsenbrenner flammenfixiert. Auf die getrocknete Bakteriensuspension wurde eine wässrige Kristallviolett- Lösung aufgetropft. Nach einer Minute wurde das Präparat mit aqua dest. abgespült. Auf die Oberfläche wurde anschließend eine Jod-Kaliumjodidlösung (sog. „Lugolsche Lösung“) aufgetropft, die wiederum nach einer Minute von der Oberfläche mit aqua dest. abgewaschen wurde.
Für die Entfärbung wurden die Proben anschließend mit 96%igem Ethanol für 30 Sekunden leicht geschwenkt. Zur Gegenfärbung der gram- negativen Zellen wurden die Proben 10 Sekunden mit Safranin- Lösung behandelt und anschließend mit aqua dest. abgespült.
Die Proben wurden ohne Deckgläschen in Ölimmersion bei 1000facher Vergrößerung mikroskopiert.

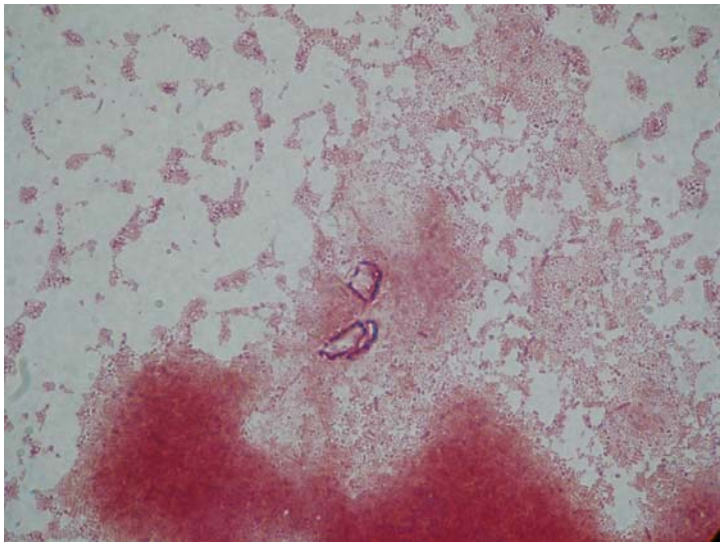
[169] Madigan et al. 2002, S.59f.
[170] die Gram- Färbung wurde nach dem Mikrobiologischen Grundpraktikum, Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, durchgeführt.
[171] 1884 durch den dänischen Arzt Christian Gram entwickelt.



Die Bakterien beider Kulturen zeigten nach der Gram- Färbung im Auflicht bei 1000facher Vergrößerung eine hellrote Farbigkeit.

In der D. desulfuricans- Kultur war nur eine Bakterien- Art erkennbar, deren Zellen eher rund oval erschienen als stäbchenförmig. Die Zellen waren weitgehend gleich groß und zeigten keine Bewegung.

Abb. 13 Desulfovibrio desulfuricans in der Gram- Färbung
Abb. 14 Desulfovibrio vulgaris in der Gram- Färbung



In der D. vulgaris- Kultur waren Stäbchen von unterschiedlicher Länge zu sehen. Teilweise erschienen einzelne Zellen auch dunkel- violett. Dabei handelt es sich um Kontaminationen der Kulturen, die sich jedoch in Größe und Form von den vorher wahrgenommenen rund- ovalen Verunreinigungen unterscheiden.

Die Gram- Färbung der auf Nährboden angezogenen Bakterien zeigte für D. desulfuricans und D. vulgaris fast ausschließlich gram- negative Organismen. Ob es sich bei den angefärbten Bakterien um die beiden Desulfovibrio- Arten handelt oder ob auf den Nährböden nur Kontaminationen in Kultur gebracht wurden, bleibt unklar.

4.4. KOH- Test[172]

Bei dem KOH- Test handelt es sich ebenfalls um eine Methode zur Unterscheidung gram-positiver und negativer Bakterien. Wiederum wird der unterschiedliche Zellwandaufbau zur Unterscheidung genutzt. Durch die Behandlung mit KOH platzen die Zellen der gram-negativen Bakterien, während die gram- positiven durch KOH nicht verändert werden. Durch die so genannte „Lyse“ (das Aufplatzen der Zellen) wird die DNS der Bakterien freigesetzt. Diese Freisetzung erhöht die Viskosität der Bakteriensuspension, die dadurch schleimig wird, die DNS lässt sich fadenförmig herausziehen.

Für den KOH- Test wurden zwei Tropfen einer 3%igen KOH- Lösung auf verschiedene Objektträger gegeben. Aus jeder Kultur wurde mit der Impföse eine kleine Menge Probenmaterial entnommen und mit dem Tropfen verrührt.
Bei der anschließenden langsamen Entfernung der Impföse aus der Lösung zeigte sich, dass die Suspension mit der Öse mitgezogen wird. Der Schleimfaden von bis zu 5 cm Länge belegte das gram- negative Verhalten beider Bakterienkulturen.

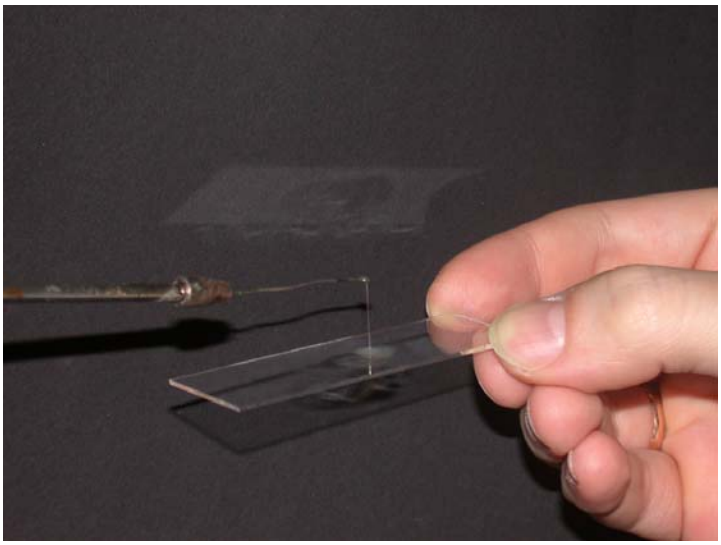


Abb. 15 Schleimfaden bei der D. vulgaris- Kultur im KOH- Test

4.5. Ergebnis

Durch die Gram- Färbung konnte das negative Gram- Verhalten der beiden Stammkulturen bestätigt werden. Die Anfärbung zeigte bei der Betrachtung unter dem Mikroskop bei 1000facher Vergrößerung bei Desulfovibrio desulfuricans optisch homogene Bakterien, die alle eine hellrote Färbung zeigten. Sie erschienen aber eher rund als stäbchenförmig. Ob es sich bei den in der Gram- Färbung nachgewiesenen, auf den Nährböden angewachsenen Bakterien tatsächlich um Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans oder um eine

[172] der KOH- Test wurde nach dem Mikrobiologischen Grundpraktikum, Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, durchgeführt.

verwandte aerobe Form handelt, ist mit den hier zur Verfügung stehenden Mitteln nicht eindeutig bestimmbar.

In der Probe der D. vulgaris- Kultur konnten zum größten Teil stäbchenförmige, gram-negative Bakterien nachgewiesen werden. Teilweise zeigte die Probe aber auch deutlich größere Stäbchen, die dunkelviolett und damit gram- positiv erschienen. Diese Fremdbakterien unterschieden sich nach optischer Sichtung aber wesentlich von den in den Vollmedien beobachteten, als Kontamination beurteilten Bakterien. Sie sind vermutlich aus der Luft auf die Nährböden geraten. Die in der Bakteriensuspension beobachteten runden Arten konnten nicht beobachtet werden.
Der KOH- Test belegte das negative Gram- Verhalten der Bakterien in beiden Kulturen. Er bestätigte das Ergebnis der Gramfärbung. Allerdings blieben bei diesem Nachweis etwaige Verunreinigungen durch Fremdkulturen unberücksichtigt.

Eine Identifizierung der als Kontamination angesprochenen Bakterien war nach beiden Versuchen nicht möglich. Die runden und in Vierergruppen auftretenden Bakterien tauchten auch nicht in jeder Kultur auf und wirkten sich nicht einschränkend auf das Wachstum der beiden Sulfatverwerter- Kulturen Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans und Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris aus. Das Alter der Kulturen scheint einen wesentlichen Einfluss auf die Kontaminationen zu haben. In zwei Wochen alten Kulturen wurden Kontaminationen beobachtet, die nach weiteren zwei Wochen nicht mehr vorhanden waren.

5. Zusammenfassung

Es gelang erfolgreich, beide Desulfovibrio- Arten im Labor anzuzüchten und über einen Zeitraum von mehreren Monaten durch regelmäßige Überimpfung am Leben zu erhalten. Das vom DSMZ vorgegebene Medium scheint geeignet, den Bakterien auch längerfristig ideale Lebensbedingungen zu schaffen und eine Vermehrung zu erzielen. Es konnten keine wesentlichen Unterschiede in der Vermehrung, Vitalität und Aktivität der beiden Kulturen festgestellt werden, so dass alle folgenden Versuche mit beiden Bakterien-Arten durchgeführt wurden. Die Verunreinigungen der Kulturen hatten keinen Einfluss auf Aktivität und Vitalität der Desulfovibrio- Arten und wurden daher nicht weiter beachtet.
Für die folgenden Versuche der Massenkultivierung wurden große Mengen an Medium mit den Bakterien angeimpft.

II. Anreicherung und Massenkultivierung der Bakterien

1. Vorüberlegungen

Nachdem Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans und Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris erfolgreich kultiviert worden waren, galt es in einem nächsten Schritt, eine möglichst hohe Biomasse an Bakterien zu produzieren, um den Einsatz der Mikroorganismen am Objekt zu ermöglichen. Dazu wurden zunächst große Mengen des Mediums mit Desulfovibrio desulfuricans und Desulfovibrio vulgaris beimpft. Die beimpften Medien wurden für zwei Wochen in der Anaerobenkammer belassen und regelmäßigen Untersuchungen unterzogen, bis extrem hohe Zelldichten nachgewiesen werden konnten.

Für die Applikation am Objekt erschien es sinnvoll, die Bakterien nicht in dem Vollmedium auf den Stein aufzubringen. In diesem stehen den Bakterien alle für den Stoffwechsel und die Aktivität notwendigen Materialien zur Verfügung, so dass sie den Gips im Stein nicht umsetzen müssen, um zu überleben. Weiterhin enthält das Medium zahlreiche verschiedene Salze, die durch Reaktionen an der Baukörperoberfläche zu Schäden führen könnten. Die Salze können am Objekt auch als Nährsalze für andere Mikroorganismen dienen.
Durch das Abtrennen aus dem Medium können die Bakterien in eine Pufferlösung überführt werden, die keine für die Sulfatverwertung notwendigen Nährstoffe enthält, in der die Bakterien aber eine gewisse Zeit (beispielsweise den Transport zur Baustelle) überleben können. Wegen der fehlenden Nährstoffe in der Lösung ergibt sich für die Bakterien die Notwendigkeit, bei der Applikation die Sulfate der Steinoberflächen anzugreifen und zu verwerten. Im Rahmen des BIOBRUSH- Projektes waren die Bakterien für die Applikation am Objekt in einen Puffer überführt worden[173].
Darüber hinaus kann durch die Abtrennung der Bakterien aus dem Vollmedium die Bakteriendichte in Suspensionen, denen sie zugefügt werden, möglicherweise extrem erhöht werden, wie es für die Applikation notwendig und sinnvoll erscheint.

Es sollte also überprüft werden, ob und auf welche Art die Zellen von dem Medium abgetrennt werden können. Sowohl Zentrifugation als auch Filtration wurden als mögliche Methoden der Trennung ohne Schädigung für die Zellen in Betracht gezogen und getestet.

[173] s. Anhang, Merkblatt Biobrush.

2. Zentrifugation

Bei der Zentrifugation werden Flüssigkeiten eine bestimmte Zeit bei hoher Geschwindigkeit gedreht, so dass schwerere Partikel aus der Lösung am Boden des Gefäßes sedimentieren. Der Überstand und das Sediment können dann getrennt voneinander weiter behandelt werden.

Abb. 16 Zentrifuge Hettich EBA 12

Im vorliegenden Fall sollten in einem ersten Schritt die größeren und festen Bestandteile des Mediums aus der Lösung entfernt werden. Damit sollte gewährleistet werden, dass die Bakterien in der Nährlösung keine oder nur noch minimale Nährstoffe finden, so dass sie bei der Applikation gezwungen sind, ihre Nährstoffe aus der Gipskruste auf dem Stein zu beziehen. Weiterhin sollte verhindert werden, dass Fremdmaterialien in die Fassade eingebracht werden. In einem zweiten Schritt sollten dann die Bakterien aus dem Restmedium abgetrennt und in einen nährstoffarmen Puffer überführt werden.
Um die Bakterien aus der Nährlösung abzutrennen, mussten Zeit und Umdrehungszahl ermittelt werden, bei der der Großteil der Medienbestandteile sedimentiert, die Bakterien jedoch weiterhin in der Suspension bleiben. Vorerst sollte die Suspension mehrfach bei geringen Drehzahlen zentrifugiert werden, damit nur die Medienbestandteile sedimentierten. Der Überstand sollte jeweils abgegossen werden. Danach sollten bei hohen Drehzahlen auch die Bakterien zum Sedimentieren gezwungen werden. Das Pellet, das sich aus konzentrierten Bakterien am Röhrchenboden sammelt, sollte dann in einer reinen Pufferlösung ohne nennenswerten Nährstoffanteil resuspendiert werden. Für den Versuch wurde eine Zentrifuge der Fa. Hettich EBA 12 genutzt.

2.1. Durchführung

Für die Abtrennung der größeren und Festbestandteile aus dem Vollmedium wurden etwa 5 ml beider Kulturen aus drei Wochen alten Anzuchten mit hohen Zelldichten entnommen und in fünf Durchgängen jeweils 5 Minuten zentrifugiert. Die Umdrehungszahl wurde dabei in 1000er Schritten von 1000 auf 5000 U/min erhöht. Nach jedem durchgeführten Zentrifugier-

Vorgang wurde aus dem oberen Bereich der Bakteriensuspension ein Tropfen entnommen und unter dem Mikroskop ausgewertet. Die beiden Kulturen verhielten sich durchweg identisch. Durch den Versuch konnte ermittelt werden, dass die Bakterien zwischen 4000 und 5000 U/min sedimentieren. Also wurde die Restlösung aufgeschüttelt und bei 4000 U/min für 5 Minuten zentrifugiert, damit die restlichen Bestandteile des Mediums weitgehend ausfallen und entfernt werden konnten.
Der Überstand wurde abfiltriert, in ein neues Röhrchen überführt und erneut bei 5000 U/min für 10 Minuten zentrifugiert. Dabei bildete sich ein helles Pellet aus Bakterienzellen am Boden des Röhrchens. Bei erneuter Probennahme aus dem oberen Bereich der Suspension konnten in dieser keine Bakterien mehr nachgewiesen werden. Die Bakterien waren sedimentiert und in dem Pellet am Röhrchenboden konzentriert. Die in der Lösung noch enthaltenen Salzkristalle waren sehr klein und traten in Mengen auf, die für die Fortführung des Versuches keine Rolle spielen dürften. Die Restlösung wurde abgegossen und das Röhrchen mit Pufferlösung aufgefüllt und geschüttelt. Dieser „Waschvorgang“ wurde 3mal durchgeführt. Nach dem Aufschütteln der Pellets in dem Puffer konnte die Zelldichte ermittelt werden.
Bei der Beprobung des Sedimentes konnte jedoch festgestellt werden, dass mehr als die Hälfte der in den Suspensionen enthaltenen Bakterien nicht von den Medienbestandteilen zu trennen waren. Die Zellen, die sich auf Partikeln des Mediums angelagert hatten, sedimentieren mit den Medienbestandteilen. Sie stehen demnach für eine Applikation nicht mehr zur Verfügung. Dennoch wurde der Überstand weiter behandelt und untersucht.

Durch das mehrfache Zentrifugieren konnten die Bakterienzellen weitgehend von den Bestandteilen des Mediums befreit werden. Es konnte eine extrem hohe Zelldichte erreicht werden. Die Zentrifuge schien dabei keinen besonderen Einfluss auf die Aktivität der Zellen zu haben, die intensive Bewegung störte die Bakterien nicht in ihrer Eigenbewegung.

2.2. Untersuchungen zur Bakterienanzahl

In einem Folgeversuch sollte ermittelt werden, welche Menge an beimpftem Medium zentrifugiert werden muss, um so viele Zellen zu erhalten, dass die Applikation auf einer Steinfassade sinnvoll erscheint. Im Rahmen des BIOBRUSH - Projektes wird für die Applikation der Bakterien auf die Steinoberfläche eine Zelldichte von 10^8 Bakterien/ml empfohlen.
Die drei Wochen alten Kulturen zeigten vor Beginn des Versuchs eine sehr hohe Zelldichte sowie partiell aktiv bewegliche Bakterien. Die Anzahl der grün fluoreszierenden Bakterien wurde für beide Kulturen auf etwa 80% geschätzt.

Für die Mengenermittlung wurden jeweils dreimal 6 ml jeder Anzucht in Greinerröhrchen überführt und bei 4000 U/min 5 Minuten zentrifugiert, um die festen Medienbestandteile weitgehend aus der Lösung zu entfernen. Der Überstand wurde in neue Röhrchen gefüllt und erneut bei 5000 U/min für 10 Minuten zentrifugiert. Danach hatte sich, wie in den vorangehenden Vorversuchen, ein Pellet aus Zellen am Röhrchenboden gebildet. Diese Pellets wurden in jeweils 0,5 ml Phosphatpuffer aufgenommen, alle drei in ein Röhrchen zusammengegeben und aufgeschüttelt. Die Bakterien wurden mittels Baclight unter dem Mikroskop auf Aktivität und Vitalität untersucht. Es konnte eine extrem hohe Zelldichte nachgewiesen werden, etwa 70-80% beider Kulturen zeigten grüne Fluoreszenz.
Die Pufferlösungen wurden anschließend erneut bei 5000 U/min 10 Minuten zentrifugiert, der Überstand erneut abgenommen und mit 0,5 ml Puffer resuspendiert. Dieser „Waschvorgang“ erfolgte insgesamt dreimal. Bei der anschließenden Auswertung unter dem Mikroskop wurde deutlich, dass die Zelldichte weiter zugenommen hatte. Nach zwei Stunden erfolgte ein Auszählen der Zelldichte mit Hilfe der Thomakammer.

2.3. Thomakammer

Abb. 17 Thomakammer

Die Thomakammer besteht aus einem plan geschliffenen Objektträger, in den in der Mitte ein von zwei Rinnen begrenzter Steg ein- geschliffen ist, und einem dicken Deckgläschen.
In den Steg des Objektträgers ist ein Netzquadrat eingeätzt, das in 16 Großquadrate unterteilt ist. Diese setzen sich wiederum aus 16 Kleinquadraten zusammen. Die Kantenlänge eines Kleinquadrates beträgt 0,05 mm, seine Fläche 0,0025 mm^2.
Vor der Auszählung wird das Deckgläschen durch vorsichtiges Andrücken auf den Objektträger geschoben. Dabei sollten an den Kontaktflächen die sog. „Newtonschen Ringe“ entstehen, die den geschlossenen Kontakt bestätigen. Durch das Deckgläschen wird dem Untersuchungsvolumen eine Tiefe von 0,1 mm definiert vorgegeben[174].
Von der Seite her wird ein Tropfen der Kultur auf den Mittelsteg des Objektträgers seitlich des Deckgläschens gegeben. Der Tropfen zieht sich unter das Deckgläschen. Die Zellanzahl kann nun unter dem Mikroskop mittels Auszählen ermittelt werden.

[174] Mikrobiologisches Grundpraktikum 2002/03, S. 31ff.

Dies erfolgt nach der folgenden Rechnung:

Ein c-Feld
Länge = 0,05 mm
Breite = 0,05 mm = 0,0025 mm^2
Tiefe = 0,1 mm = 0,00025 mm^3

1 Zelle / Kleinquadrat
= 1 Zelle / 0,5 x 0,5 x 0,1 mm^3
= 1 Zelle / 0,00025 mm^3
= 1000 Zellen / 0,25 mm^3
= 4000 Zellen / 1 mm^3 (1000 mm^3 = 1 cm^3 = 1 ml)
= 4000000 Zellen / ml
= 4 x 10^9 Zellen / l

Die aus 18 ml beimpftem Medium erzielte Zelldichte in der Pufferlösung lag bei ~ 80^8 Bakterien/ml. Da die Angabe des BIOBRUSH - Projektes für die Applikation der Bakterien auf die Steinoberfläche eine Zelldichte von 10^8 Bakterien/ml vorschlägt, wurden die beiden Bakteriensuspensionen verdünnt, bis die gewünschte Zelldichte erreicht war.

Aus 18 ml beimpften Medium mit drei Wochen alten Kulturen konnte für Desulfovibrio desulfuricans 12 ml beimpfter Puffer produziert werden, während für Desulfovibrio vulgaris 20 ml Puffer mit der gewünschten Zelldichte produziert werden konnte.
Damit lag die Menge des gewonnenen Puffers etwa in dem Bereich der zu Beginn eingesetzten Medium- Menge.
Mit der großen Anzahl an Zentrifugier- Durchgängen ist ein hoher Sauerstoffeintrag verbunden, der die Bakterien längerfristig möglicherweise stressen kann. Für den im Ergebnis relativ kleinen Anteil an gewonnener, mit Bakterien beimpfter Puffermenge erscheint der Vorgang sehr aufwendig und zeitintensiv.

2.4. Berücksichtigung der „log“- Phase

Der Versuch wurde mit vier Tage alten Kulturen wiederholt, um zu gewährleisten, dass sich, entsprechend der Empfehlung des BIOBRUSH- Projektes, die Bakterien in der „Log-Phase“[175] befinden[176]. Als Puffer wurde der selbst hergestellte Phosphatpuffer[177] verwendet. Die Zentrifugier- Vorgänge erfolgten analog zu dem ersten Versuch. Die Durchführung der Zentrifugation mit Waschvorgängen nahm für die bearbeiteten 80 ml Medium 1 ½ bis 2 Stunden in Anspruch.

[175] log-Phase = Zeit exponentiellen Wachstums.
[176] s. Anhang, Datenblatt zur Überführung der Bakterien in die Pufferlösung.
[177] s. Anhang, Datenblatt, Phospat- Puffer.

Aus 40 ml beimpftem Medium jeder Desulfovibrio- Kultur konnte bei den erst vier Tage alten Kulturen von Desulfovibrio desulfuricans und Desulfovibrio vulgaris nur bei Desulfovibrio vulgaris die erwünschte Zelldichte von 10^8 Zellen /ml gewonnen werden. Die Desulfuricans-Bakterien zeigten in dem gewonnenen Puffer nur eine Zelldichte von 4^7 Zellen/ml. Damit konnten beide Pufferlösungen nicht weiter verdünnt werden. 40 ml der Lösungen hatten für die Vulgaris- Kultur gerade eine Puffermenge von 0,5 ml gebracht. Bei den nach jedem Zentrifugier- Durchgang durchgeführten Aktivitätsnachweise wurde deutlich, dass in der Suspension jeweils eine nicht unerhebliche Anzahl Bakterien vorlagen, die sich nicht im Pellet am Röhrchenboden gesammelt hatten. Es mag sinnvoll sein, die Zahl der Zentrifugier-Durchgänge oder die Dauer zu erhöhen, um wirklich den Großteil der in der Suspension enthaltenen Bakterien zu erfassen und in die weitere Verwertung mit einzubeziehen.
Darüber hinaus war schon in der Anaerobenkammer beobachtet worden, dass die Vulgaris-Bakterien deutlich schneller das Medium entfärben, also nachweisbar aktiv werden. Die Aktivität zeigt sich auch in der intensiven Bewegung, die diese Bakterien zeigen. Bei beiden Kulturen konnte jedoch bei über 90% der Bakterien Vitalität durch grüne Fluoreszenz nachgewiesen werden.

Die Zelldichte war bei den vier Tage alten Kulturen zu gering, um eine für die Applikation geeignete Menge Bakteriensuspension zu gewinnen. Auch die Durchführung mit 7 Tage alten Kulturen ergab zu geringe Zelldichten. Um die Zelldichte von 10^8 Zellen /ml zu erreichen, müssen noch ältere Kulturen verwendet werden. Damit ist aber nicht mehr gewährleistet, dass sich die Kulturen in der Log- Phase befinden. Dies muss billigend in Kauf genommen werden.
Aus technischen Gründen war es mit der an der HAWK zur Verfügung stehenden Zentrifuge nicht möglich, Bakterien in den nötigen Mengen in maximal 2 Stunden zu zentrifugieren. Der Sauerstoffeintrag durch jede Zentrifugation sowie die Wartezeit, bis eine ausreichende Menge an mit Bakterien beimpftem Puffer für die Applikation zur Verfügung steht, erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines vermehrten Absterbens der Zellen oder der Kontamination der Kulturen bereits vor der Durchführung der Maßnahme.

2.5. Ergebnis

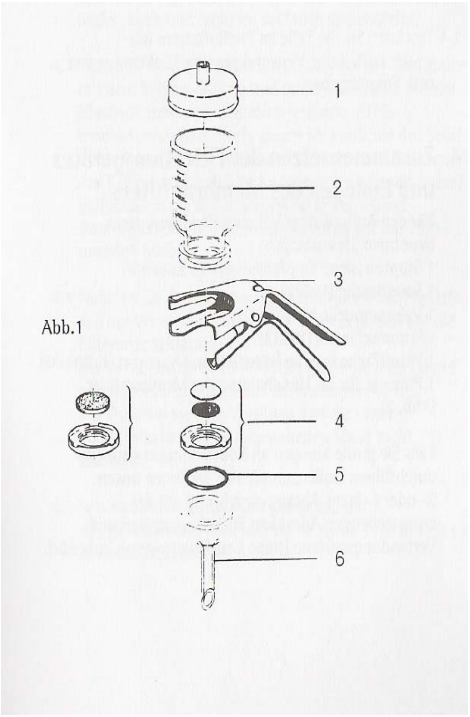
Durch das Zentrifugieren konnten Bakterien beider Kulturen von dem Medium abgetrennt werden. Die zentrifugierten Suspensionen enthielten zahlreiche Bakterien und nur noch minimale Anteile ungelöster Medienbestandteile, die jedoch keine erhebliche Rolle spielen dürften. Zahlreiche Bakterienzellen sedimentierten jedoch mit den Medienbestandteilen und

waren nicht weiter von den Partikeln zu trennen. Sie standen für eine weitere Verwertung innerhalb des Versuches nicht mehr zur Verfügung.
Das Zentrifugieren erscheint aufgrund der geringen Fassungskapazität der verwendeten Zentrifuge sehr zeitaufwendig. In einem Durchgang, der etwa 1 ½ Stunden dauert, können maximal 96 ml Medium zentrifugiert werden.
Kulturen, deren Bakterien sich definitiv in der Log- Phase befinden (Alter vier bis sieben Tage), wiesen für die Zentrifugation zu geringe Zelldichten auf. Wie in den Vorversuchen festgestellt, sind Desulfovibrio vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans aber in der Lage, über mehrere Wochen in dem Medium zu überleben. Damit befinden sich wahrscheinlich immer Bakterien in den Kulturen in der Log- Phase. So blieb der Aspekt der Log- Phase unberücksichtigt.
Aufgrund der für die Fassadenbehandlung notwendigen großen Mengen an Bakterien erscheint diese Methode für die Trennung der Bakterien aus dem Medium nicht durchführbar. Der Gewinn an Zellen ist zu gering. Auch der mit dem Zentrifugieren verbundene Sauerstoffkontakt der Suspension schränkt vermutlich die Praktikabilität weiter ein.

Möglicherweise kann ein besseres Ergebnis durch Filtration der Bakteriensuspensionen erreicht werden. Dazu müsste es möglich sein, große Mengen Bakteriensuspension in möglichst kurzer Zeit zu filtrieren und damit die Medienbestandteile abzutrennen.

3. Filtration

Abb. 18 Glasfiltrationsgerät Sartorius 16316



Bei der Filtration von Lösungen werden gröbere oder feinere Bestandteile aus einer Lösung mit Hilfe eines Filters abgetrennt. Das für den Versuch genutzte Glasfiltrationsgerät der Fa. Sartorius besteht aus einem Glasaufsatz, der oben mit einem Gummideckel verschließbar ist. Dieser Glasaufsatz wird auf eine Filterunterstützung mit PTFE- Stützsieb und PTFE- Lochblech aufgesetzt. Zwischen dem Glasaufsatz und der Filterplatte sind verschiedene Filter einsetzbar. Die Filterunterstützung wird mit einem Gummiring als Dichtung auf dem Glasunterteil befestigt. Alle Einzelteile können durch eine Metallklammer miteinander verbunden werden. Das System wird mit Gummidichtungen auf einer großen Erlenmeyerkolben- Flasche befestigt. An die untere Flasche kann die Vakuum- Wasserstrahlpumpe mit einem Schlauch angeschlossen werden, damit in der Flasche ein Vakuum erzeugt wird. Die Lösung wird in den oberen Kolben gegeben. Durch den Fließdruck sowie das erzeugte Vakuum läuft die Lösung in die untere Flasche. Dabei bleiben die Bestandteile der Lösung je nach Porendurchmesser des Filters in demselben zurück.

Für die Filtration des Mediums wurden Filter in zwei verschiedenen Porendurchmessern genutzt. Der erste Filter mit einem Porendurchmesser von 8 µm sollte die festen und gröberen Bestandteile des Mediums zurückhalten, während die Bakterien den Filter passieren sollten. In einem zweiten Schritt war vorgesehen, die Bakterien in einem Filter mit einem Porendurchmesser von 0,45 µm abzufangen und den Filter mit den anhaftenden Zellen danach in einen Puffer zu überführen. Diese Methode sollte gewährleisten, dass Bakterien in sehr hohen Zelldichten in einer weitgehend nährstofffreien Suspension appliziert werden können.

3.1. Durchführung

Etwa 250 ml mit Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris beimpftes Medium wurden aus der Anaerobenkammer geschleust und mit Hilfe eines Glasfiltrations- Gerätes sowie einer Wasserstrahlpumpe filtriert.

Das Medium wurde in den oberen Kolben gegeben und die Vakuumpumpe angeschlossen. Nach etwa 45 min hatte die gesamte Menge Lösung die Filter passiert. Der obere Teil des Filtrationsgeräts wurde gelöst und der Filter entnommen. Auf dem Papier hatte sich eine etwa 1 mm dicke schwarze Schicht aus Bestandteilen der Suspension, die größer als 8 µm waren, abgesetzt. Der Niederschlag enthielt neben den Medienbestandteilen auch größere Mengen Bakterien, die durch die Medienbestandteile am Passieren des Filters gehindert worden waren.
Das Filtrat wurde nun erneut mit dem feinen Filter mit einem Porendurchmesser von 0,45 µm filtriert. In diesem Filtrat konnten nur noch einzelne Zellen nachgewiesen werden. Somit hatte der Filter mit dem Porendurchmesser von 0,45 µm den Großteil der Bakterien wie geplant abgefangen. Auf dem Filter war ebenfalls eine dünne schwarze Schicht aus sedimentierten Partikeln zu erkennen.
Das Filterpapier, das die Bakterien abgefangen hatte, wurde in 100 ml Puffer gegeben, diese wurde geschüttelt und die Suspension mikroskopisch auf lebende und aktive Zellen untersucht.

Kultur Vulgaris	Gegenstand der Untersuchung			
Behandlung		Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
1 Filtrierdurchgang (8 µm)	Lösung	mittel	Stark	100
2 Filtrierdurchgänge (8 und 0,45 µm)	Lösung	sehr gering	Stark	50
Filter I Rückstand (8 µm)	Rückstand	extrem hoch	Keine	>80
Filter II in 100 ml Puffer (0,45 µm)	Lösung	mittel	Mittel	100
Filter II in Puffer nach 2 Tagen	Lösung	hoch- sehr hoch	partiell	100
Filter II in Puffer nach 6 Tagen	Lösung	mittel	Keine	100
Filter II in Puffer nach 14 Tagen	Lösung	hoch	Mittel	>80

Tabelle 2 Betrachtung der Lösungen bzw. Sedimente während und nach der Filtration von 250 ml Medium, beimpft mit Desulfovibrio vulgaris

Der Aktivitätsnachweis an der Restlösung nach dem ersten Filtrationsdurchgang ergab eine mittlere Zelldichte bei starker Bewegung und 100% grün fluoreszierenden Zellen. Zur Überprüfung wurde auch der Niederschlag auf dem ersten Filter (8 µm) beprobt. Es ergab sich, dass ein Großteil der Bakterien durch den Filter aufgehalten worden waren. In dem Niederschlag konnte eine extrem hohe Zelldichte mit über 80% lebendigen Zellen ermittelt werden, die jedoch aufgrund der Dichte der Masse keine Bewegung zeigten. Nach der zweiten Filtration mit dem feineren Filter konnten in der Restlösung kaum mehr Bakterien nachgewiesen werden. Für die Pufferlösung, in die das zweite Filterpapier eingebracht worden war, wurde eine mittlere Zelldichte bei 100% lebendigen Zellen, die mittelstarke Bewegung zeigten, ermittelt.

Der verwendete 8 µm- Filter hatte sich innerhalb kürzester Zeit aufgrund der erheblichen Menge an größeren festen Medienbestandteilen zugesetzt und war verstopft. Durch die Verdichtung des Filters wurden auch große Mengen der Bakterien bereits während der ersten Filtration abgefangen. Daher wurde in einem nächsten Versuch eine kleinere Menge Medium in zwei Schritten filtriert.

Im zweiten Durchgang wurden etwa 100 ml mit der V- Kultur beimpftes Medium in den oberen Kolben gegeben und die Vakuumpumpe angeschlossen.
Auch diesmal zeigte sich ein schwarzer dicker Film auf dem Filter. Der Filter ebenso wie die Restlösung wurden einem Aktivitätsnachweis unterzogen.
Das Filtrat wurde wiederum mit einem feinen Filter auf entsprechende Art filtriert. In der nun entstandenen Restlösung konnten nur noch einzelne Zellen nachgewiesen werden.
Das Filterpapier, das die Bakterien abgefangen hatte, wurde in eine Pufferlösung gegeben, geschüttelt und anschließend einem Aktivitätstest unterzogen.

Kultur Vulgaris	Gegenstand der			
Behandlung	Untersuchung	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
1 Filtrierdurchgang (8 µm)	Lösung	hoch- sehr hoch	Stark	100
2 Filtrierdurchgänge (8 und 0,45 µm)	Lösung	sehr gering	Keine	50
Filter I Rückstand (8 µm)	Rückstand	extrem hoch	Keine	90
Filter II in Puffer (0,45 µm)	Lösung	extrem hoch	Mittel	>95
Filter II 2 Tage	Lösung	sehr hoch	Keine	10-20
Filter II 6 Tage	Lösung	extrem hoch	Keine	<5
Filter II 13 Tage	Lösung	extrem hoch	Partiell	<5

Tabelle 3 Betrachtung der Lösungen bzw. Sedimente während und nach der Filtration von 100 ml Medium, beimpft mit Desulfovibrio vulgaris

Auch bei der Filtration von 100 ml Bakteriensuspension zeigte sich, dass ein Großteil der Bakterien nicht in der Lage ist, den ersten Filter zu passieren, weil die Medienbestandteile diesen innerhalb kurzer Zeit verstopfen. Für den ersten Filter wurde eine extrem hohe Zelldichte bei mittlerer Bewegung mit über 95% aktiven Zellen nachgewiesen. Das Filtrat wies ebenfalls eine hohe Zelldichte mit zu 100% grün fluoreszierenden Bakterien auf, die sich stark bewegten. In der zweimal filtrierten Restlösung konnten erneut nur einzelne Bakterien nachgewiesen werden, so dass bestätigt wurde, dass der feine Filter in der Lage ist, die Bakterien abzufangen. Für die Pufferlösung, in die das feine Filterpapier gegeben worden war, wurde eine sehr hohe Zelldichte mit etwa 95% lebendigen Bakterien mit mittelstarker Bewegung nachgewiesen.

3.2. Ergebnis

Es gelang mit den Filtrationsversuchen erfolgreich, die Bakterien aus dem Medium abzutrennen. Dabei wurde ein Zwei- Schritte- System wie bei der Zentrifugation gewählt. Ein erster Filter sollte die erheblichen Medienbestandteile zurückhalten. Wie bei der Zentrifugation hinderten die Medienbestandteile durch Zusetzen des Filters große Mengen der Bakterien daran, den ersten Filter zu passieren. Diese standen demnach für eine spätere Applikation nicht mehr zur Verfügung.
Durch den zweiten Filter konnten die restlichen in der Suspension vorhandenen Bakterien erfolgreich aus dem Medium abgetrennt werden.
Die Filtersysteme sind bei großen Mengen Medium schnell nicht mehr oder nur noch sehr eingeschränkt passierbar. Daher müssen kleinere Mengen als 100 ml in Einzelschritten filtriert werden, um zu gewährleisten, dass ein Großteil der Bakterien den ersten Filter passieren kann. Damit werden jedoch der Sauerstoffkontakt der Suspension und die Dauer der Durchführung erheblich erhöht. Die Methode erscheint angesichts der für eine Fassadenbehandlung benötigten Menge Bakteriensuspension ebenfalls nicht ratsam.

4. Zusammenfassung

Sowohl durch Zentrifugation als auch Filtration des beimpften Nährmediums waren die erforderlichen hohen Zelldichten zwar zu erzielen, jedoch konnte mit beiden Methoden ein Großteil der Bakterien nicht von den Medienbestandteilen getrennt werden. Beim Zentrifugieren sedimentierten zahlreiche Zellen mit den größeren Bestandteilen des Mediums, während bei der Filtration die Medienbestandteile den Vorfilter sehr schnell zusetzten und die Bakterien diesen so nicht passieren konnten. Der Verlust an Zellmasse erwies sich für das eigentliche Ziel, eine Aufkonzentrierung zu erreichen, als zu hoch. Es muss jedoch bedacht werden, dass sowohl die Zentrifugation als auch die Filtration das Wachstum und die Vermehrung einzelner Bakterienzellen als solche in keinster Weise einschränken.
Beide Methoden erschienen sehr zeitintensiv und aufgrund der benötigten Menge an Bakterien für die Applikation an der Fassade nicht durchführbar.

Um bei der Applikation der Bakterien am Objekt den Eintrag an Fremdmaterialien aus dem Medium so weit wie möglich zu reduzieren, erschien ein Vorverdünnen der Kulturen mit reinem Puffer die einzige Lösung.

III. Verdünnen des Nährmediums und Überprüfung der Bakterientätigkeit

Vorversuche hatten ergeben, dass die Bakterien nicht vollständig und in für die Applikation ausreichender Menge aus dem Medium abgetrennt werden konnten. Es erschien daher sinnvoll, die Bakteriensuspension soweit zu verdünnen, dass Bakterien in großen Mengen in der Lage sind, auch in dieser verdünnten Suspension zu überleben und hohe Zelldichten zu entwickeln. Hohe Zelldichten sind die Voraussetzung für eine erfolgreiche Applikation[178].
In einem Folgeversuch sollte überprüft werden, ob und wie stark die Bakterien in unterschiedlich verdünnten Suspensionen Gipswürfeloberflächen angreifen. Anhand des Vergleiches verschiedener Verdünnungen mit dem Vollmedium galt es zu ermitteln, wie stark dieses verdünnt werden kann, ohne die Bakterientätigkeit zu reduzieren.
Für die Überprüfung des Angriffs der Bakterien auf Gipswürfeloberflächen wurden zunächst kleine Mengen Bakteriensuspension in verschiedenen Verhältnissen mit Pufferlösung (3:1, 5:1, 6:1) verdünnt. Zu diesen sollten kleine Gipswürfel zugegeben werden. Die Auswertung sollte mikroskopisch durch Vergleich der Suspensionen mit dem Vollmedium und mit in der Filtration gewonnenem beimpftem Puffer erfolgen. Durch Betrachtung der Gipswürfeloberflächen sollte weiterhin überprüft werden, ob die Bakterien in Suspension überhaupt Gips umsetzen und inwieweit die Steinoberflächen durch sie angegriffen werden.

1. Hälterung der Bakterien

Gibt man Gips in Form eines Steinwürfels zum Medium, so ist dieser anschließend als Stück wieder entfernbar. Den Bakterien wird für die Dauer der Zugabe ein zusätzlicher Elektronenakzeptor[179] angeboten, und es kann überprüft werden, ob der Gipswürfel auch dann angegriffen wird, wenn in dem Nährmedium ausreichend Nährstoffe vorhanden sind. Weiterhin beweist eine erhöhte Anzahl an Organismen gegebenenfalls den positiven Einfluss auf den Stoffwechsel der Bakterien.
Ein Angriff auf die Oberfläche der Gipswürfel kann weiterhin Hinweise auf die Aktivität der Bakterien liefern. Möglicherweise ist auch eine gravimetrische Ermittlung der Substratverwertung durch Abnahme des Gewichtes der Gipswürfel möglich.

Aus einem reinen Gipsstein (Anhydrit) wurden kleine Gipswürfel mit einer Kantenlänge von 0,7 x 0,7 x 0,2 cm gesägt. Die Oberflächen der Würfel wurden mit Schleifpapier plan geschliffen und poliert, um Veränderungen deutlicher hervortreten zu lassen. Die Würfel wurden gewogen und unterschiedlichen Kulturen beigegeben. Parallel wurden Würfel in aqua dest., in reinem unbeimpftem Puffer, reinem Medium und einer Puffer- Medium-

[178] gemäß den Vorgaben des BIOBRUSH- Projektes.
[179] das Medium 63 enthält gemäß Vorgaben der DSMZ die Sulfatsalze Na_2SO_4, $MgSO_4$ und $FeSO_4$.

Mischung im Verhältnis 4:1 gelagert, um die Veränderungen, die auf die Anlösung der Oberflächen durch die Lösungen zurückzuführen sind, ermitteln zu können.

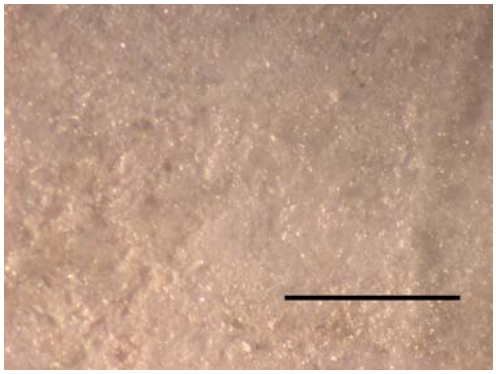
Gips-Nr.	Anfangs-gewicht	Lösung	Kultur	Versuchs-dauer	End-gewicht	Differenz	Gewichtsverlust in M%
1	1,2174	reines Medium	D. desulfuricans	14 Tage	1,1783	0,0391	3,21
2	1,3970	reines Medium	D. vulgaris	14 Tage	1,3661	0,0309	2,21
3	1,1949	reines Medium	D. desulfuricans	14 Tage	1,0255	0,1694	14,18
4	1,2713	reines Medium	D. vulgaris	14 Tage	1,1355	0,1358	10,68
5	0,7971	3 ml P, 1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	0,7117	0,0854	10,71
6	0,7078	3 ml P, 1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	0,6093	0,0985	13,92
7	1,6579	5 ml P,1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	1,6315	0,0264	1,59
8	2,0905	5 ml P,1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	2,0618	0,0287	1,37
9	0,9188	6 ml P, 1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	0,8493	0,0695	7,56
10	0,8946	6 ml P, 1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	0,8493	0,0453	5,06
11	0,8163	reiner Puffer	D. desulfuricans	14 Tage	0,7075	0,1088	13,33
12	0,8693	reiner Puffer	D. vulgaris	14 Tage	0,7757	0,0936	10,77
13	1,7208	reiner Puffer	D. desulfuricans	14 Tage	1,7097	0,0111	0,65
14	1,7991	reiner Puffer	D. vulgaris	14 Tage	1,7890	0,0101	0,56
15	1,5398	aqua dest.	./.	14 Tage	1,5428	-0,0030	-0,19
16	0,7271	reines Medium	./.	14 Tage	0,7114	0,0157	2,16
17	0,7532	4 ml P, 1 ml M	./.	14 Tage	0,7416	0,0116	1,54
18	1,0710	unbeimpfer P	./.	14 Tage	1,0706	0,0004	0,04

Tabelle 4 Gewichtsveränderung an Gipswürfeln durch Lagerung in verschiedenen Nährlösungen mit Bakterien

Die Würfel verblieben 14 Tage in den unterschiedlichen Lösungen. Die Gipswürfel trockneten nach Entnahme aus den verschiedenen Nährlösungen unter Laborbedingungen aus. Alle Würfel wurden 3 Tage nach Entnahme aus den Suspensionen gewogen und unter dem Mikroskop auf optische Veränderungen untersucht.

2. Bewertung der Gipswürfeloberflächen im Auflicht

Die Betrachtung der Steinoberflächen unter UV- Licht mit Anfärbung durch Baclight während der laufenden Versuche hatte ergeben, dass diese von den Bakterien „rasenartig“ überzogen worden waren. Weiterhin erschienen die Steinoberflächen deutlich angelöst. Die Bakterien beider Kulturen zeigten eine starke Affinität zu den Oberflächen der Gipswürfel. In der Nährlösung waren weiterhin leichter lösliche Partikel des Gesteins, die sich von den Steinoberflächen gelöst und im Medium verteilt hatten, erkennbar. Auch diese kleineren Partikel waren übersäht mit Bakterien.



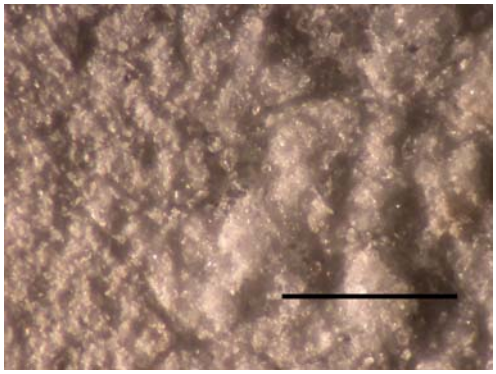


Abb. 19 und 20 Oberfläche des 14 Tage in aqua dest. gelagerten Steines im Vergleich mit Gips 14 Tage in Puffer (▬ = 1 mm)

Auch die Betrachtung der Gipswürfel im Auflichtmikroskop ergab eine deutliche Veränderung der Oberflächen. Die zuvor polierten Oberflächen wirkten rauer und unebener. Partiell hatten sich größere Teile der Oberfläche abgelöst, die sich schichtenweise abschieben ließen. Partiell war es zu einer leichten Aufhellung gekommen. Weichere Partien wirkten regelrecht ausgewaschen.

Ein Vergleich mit dem für längere Zeit in reinem aqua dest. gelagerten Gipswürfel sowie den Gipswürfeln in unbeimpftem Puffer, unbeimpftem Medium und der unbeimpften Puffer- Medium- Mischung ergab, dass die Aufrauung der Oberflächen ganz wesentlich auf die Bakterien zurückzuführen ist, die die Oberfläche angreifen und den Gips umsetzen. Die Fotodokumentation ist im Anhang beigefügt.

3. Gewichtsveränderungen der Gipswürfel

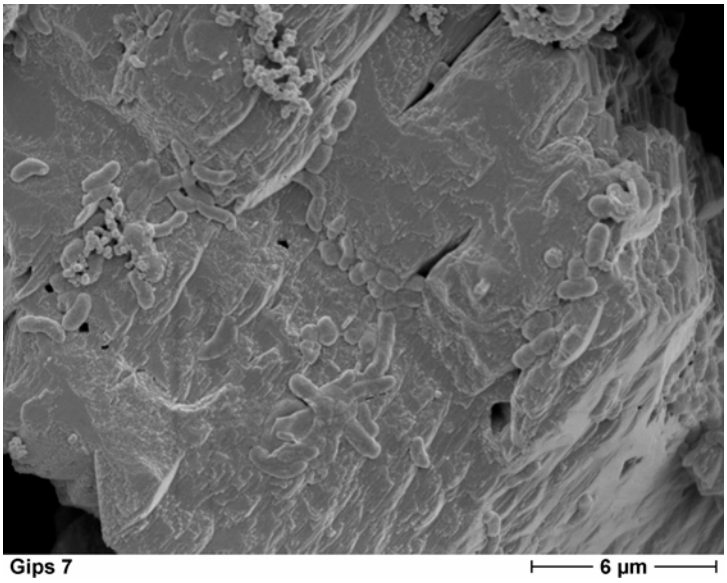
Der Vergleich des Gewichtes der Würfel vor und nach der Lagerung in unterschiedlichen Bakteriensuspensionen ergab, dass es bei allen beprobten Steinen (außer Wasser-Lagerung) zu einer Gewichtsabnahme gekommen war. Größere Gewichtsverluste konnten bei in beimpftem Vollmedium, Pufferlösung und in Puffer- Medium- Mischung (3:1) gelagerten Gipswürfeln nachgewiesen werden.

Dagegen zeigten die Würfel aus Suspensionen ohne Bakterienzugabe keine bis minimale gravimetrische Veränderungen. Der in aqua dest gelagerte Stein nahm eine geringe Menge an Wasser auf. Der Stein in reinem Puffer ohne Bakterienzugabe zeigte eine minimale Gewichtsabnahme von 0,0004 g, eine Größenordnung, die gegenüber den Ergebnissen anderer Würfel vernachlässigt werden kann. Die Gewichtsabnahme des in reinem Medium gelagerten Würfels ist vergleichbar mit dem der in Bakterienkultur gelagerten Würfel 1 und 2. Der Gewichtsverlust ist mit etwa 2 M% eher gering. Der Gewichtsverlust des in unbeimpfter Puffer- Medium- Mischung gelagerten Würfels ist mit etwa 1,5 M% ebenfalls sehr gering.

Durch die Veränderung des Gewichtes und der Würfeloberfläche wurde die Bakterientätigkeit eindeutig belegt. Die massiven Veränderungen gehen jedoch nicht nur auf die Bakterien zurück, auch in dem unbeimpften Medium und Puffer- Medium- Mischungen kam es zu einer Gewichtsreduzierung, die nicht auf Bakterientätigkeit zurückgeführt werden kann, sondern einer leichten Anlösung der Oberflächen zuzuschreiben ist. Der unterschiedlich starke Angriff der Oberflächen hängt möglicherweise auch mit dem Alter der Kulturen zusammen, ebenso können äußere Einflüsse wie z.B. die Temperatur eine Rolle spielen.
Die Ergebnisse von identischen Messungen liegen teilweise weit auseinander, wie der Vergleich der in beimpften Puffer gelagerten Würfel 11 und 12 sowie 13 und 14 verdeutlicht. Die vier Würfel wurden identisch behandelt, dennoch zeigen die Würfel 11 und 12 eine sehr viel stärkere Gewichtsabnahme. Auch diese ist vermutlich auf das Alter der Kulturen bzw. die „log“- Phase zurückzuführen. Weiterhin muss auch berücksichtig werden, dass der Stein zwar sehr dicht ist, trotzdem aber Inhomogenitäten aufweisen kann. Das Steinmaterial zeigt partiell eine dunkle Bänderung, die im EDX als Magnesium und Sauerstoff identifiziert wurde. Auch dies kann die Bakterientätigkeit beeinflussen.
Mit der Puffer- Medium- Mischung konnten gute, zu dem reinen Medium vergleichbare, Ergebnisse erzielt werden. Die besten Ergebnisse erzielten Puffer- Medium- Mischungen im Verhältnis 3:1. Um den Anteil an Medium weiter zu reduzieren, wurde im Folgenden ein Mischverhältnis von 4:1 überprüft und als geeignet eingestuft. Dieses wurde für die folgenden Versuche am Objekte genutzt.

4. Betrachtung der Gipswürfel im Rasterelektronenmikroskop

Um zu ermitteln, in welcher Form die Bakterien die Oberflächen der Gipswürfel angreifen, wurden die Proben 7 und 13 nach Versuchsdurchführung für die Beprobung im REM vorbereitet.
Die REM- Aufnahmen der Gipswürfeloberflächen zeigen eine mäßige Besiedlung. Die Bakterien legen sich partiell rasenartig auf die Oberfläche. Vereinzelt konnte auch beobachtet werden, wie sie sich in die Oberfläche „einfraßen“. Ein die gesamten Oberflächen bedeckender Rasen, wie er bei den ersten Betrachtungen unter UV- Licht beobachtet worden war, konnte nicht nachgewiesen werden.



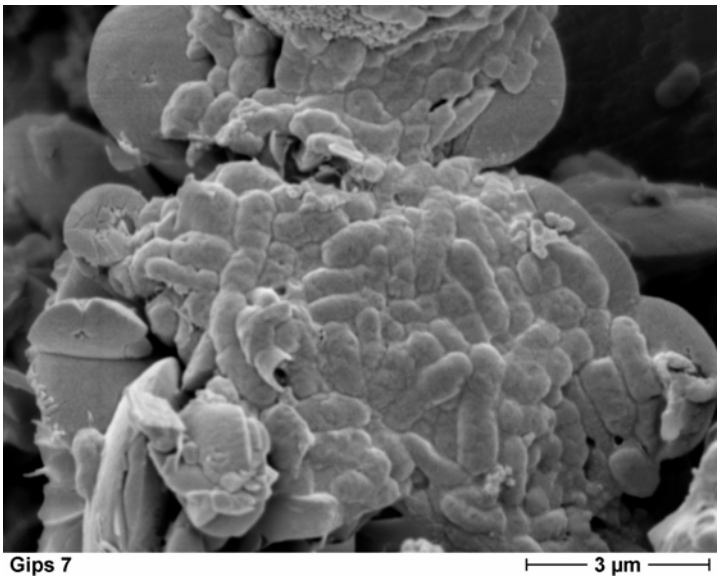


Abb. 21 und 22 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Bakterien auf der Gipswürfeloberfläche

5. Vergleich der Bakterienvitalität und –aktivität mit und ohne Gipswürfelzugabe

Nach Entnahme der Gipswürfel wurden die Suspensionen erneut einem Aktivitätsnachweis unterzogen. Die Ergebnisse wurden jeweils mit Kulturen im selben Alter ohne Zugabe von Gipswürfeln verglichen.

Es zeigte sich, dass die Zugabe von Gipswürfeln einen leicht positiven Einfluss auf das Wachstum der Bakterien hatte. Außerdem war zu beobachten, dass die Bakterien kleinere Partikel der Steinoberfläche abgelöst hatten. Diese schwammen in der Suspension und waren stark von den Bakterien besiedelt.

Die Zugabe der Gipswürfel zu Nährlösungen kann als Alternative zu regelmäßiger Überimpfung dienen, wenn z.B. Kulturen einen längeren Zeitraum transportiert werden müssen.

6. Ergebnis

Die sulfatreduzierenden Bakterien verwerteten Gipswürfel in Medium, Puffer- Medium-Mischungen und Puffer. Die Oberflächen der Gipswürfel zeigten deutlich den Angriff durch die Bakterien. Ebenso kam es bei fast allen Gipswürfeln zu einer Gewichtsabnahme. Zur Kontrolle wurden auch Gipswürfel in Lösungen ohne Bakterienzugabe gelagert.
Der Versuch ergab, dass die Veränderungen der Gipswürfel zu einem entscheidenden Teil auf die Tätigkeiten der Bakterien und nur sekundär auf eine Anlösung zurückgehen.
Die Zugabe der Gipswürfel zu den Bakteriensuspensionen zeigte weiterhin auch einen leicht positiven Einfluss auf die Vitalität und Aktivität der Bakterien. Diese kann jedoch gegebenenfalls für den längeren Transport genutzt werden. Dennoch sollte, wenn möglich, von einer Zugabe von Gipswürfeln zu dem Nährmedium abgesehen werden, da damit die Möglichkeit besteht, bei Applikation der Kulturen Schadsalz mit in das Steingefüge einzuführen.
Die rasterelektronischen Aufnahmen der Gipswürfeloberflächen zeigten eine rasenartige Anlagerung der Bakterien auf den Steinwürfeln, die auch unter UV- Licht bei Anfärbung der Bakterien mit Baclight beobachtet werden konnte.
Das Puffer- Medium- Mischverhältnis von 3:1 hatte bei der Gipsverwertung ein zu dem Nährmedium vergleichbares Ergebnis erzielt, während der Umsetzung der stärkeren Verdünnungen deutlich unter diesem Ergebnis lagen. Daher erschien ein Mischverhältnis von Puffer : Medium 4:1 für die Applikation geeignet. Diese Mischung zeigte eine für die Applikation ausreichende Anzahl an Bakterien[180]. Im Folgenden wurden für die Applikation Puffer- Medium- Mischungen ein Verhältnis von 4:1 genutzt.

IV. Auswahl geeigneter Kompressenmaterialien

Bevor mit der Applikation der Bakterien auf die Steinoberflächen begonnen wurde, sollten die Bakteriensuspension in ihrer Konsistenz so verändert werden, dass ein Verbleib auf der Oberfläche über einen längeren Zeitraum gewährleistet war. Dazu musste die Suspension durch einen ausgewählten Zuschlagstoff angedickt werden, der die Wirksamkeit der Bakterien in keiner Form einschränkte und gleichzeitig keine negativen Begleit- oder Folgeerscheinungen für den Stein selbst entwickelte. In der Restaurierung werden verschiedene Füllstoffe verwendet, um Lösungen in Kompressenform auf Steinoberflächen zu applizieren. Weiterhin ist für die Bakterienapplikation auch die Verwendung von eigens für die Bakterienapplikation entwickelten Folienkompressen bekannt.

[180] entsprechend Vorgaben des BIOBRUSH- Projektes.

Es galt also, verschiedene Kompressenmaterialien auf ihre Eignung zu überprüfen, eine Auswahl zu treffen und die Applikationstechnik gegebenenfalls zu verbessern.

1. Begrifflichkeit

Der allgemeine Begriff „Kompresse“ bezeichnet mit Lösemittel getränkte Feststoffe[181]. Kolloidale Gemische aus Lösemitteln und feindispersen Materialien mit großer innerer Oberfläche werden als Phasen bezeichnet. Hochviskose Systeme aus Lösemitteln und einem relativ geringen Anteil quellfähiger Verdickungsmittel werden dagegen als Lösemittel-Gele bezeichnet[182]. Folgt man dieser Definition, so soll im Folgenden von Gel- Applikation gesprochen werden.

Bei der Verwendung von Gel- Applikationen müssen der Oberflächenzustand und ggf. der Schichtenaufbau des zu behandelnden Materials, die genaue Bestimmung der verwendeten Materialien, die Auswahl der Auftragstechnik und Wirkungsweise, die gründliche und möglichst rückstandsfreie Abnahme sowie die gründliche Nachuntersuchung der behandelten Flächen berücksichtigt werden[183].

Im Rahmen des BIOBRUSH- Projektes war für die Applizierung der Bakterien auf die Steinoberfläche Carbopol® als Verdickungsmaterial genutzt worden[184]. Die Bakterien-suspension war mit einer definierten Menge Carbopol zubereitet und auf die Steinoberflächen aufgebracht worden. Das Verdickungsmittel wurde im Rahmen der Voruntersuchungen in Hinblick auf Auswirkung auf Bakterienzellen und Stein überprüft.

2. Carbopol

Carbopol[185] wird von der Firma BF Goodrich seit den 50er Jahren unter anderem für die Körperpflegemittelindustrie und die pharmazeutische Industrie zur Verdickung von wässrigen Systemen, zur Suspendierung unlöslicher Bestandteile und zur Stabilisierung von Öl/Wasser- Emulsionen hergestellt[186]. Unter dem Namen werden verschiedene Typen vernetzter Acrylsäurepolymere angeboten, die sich im Molekulargewicht, in ihrer molekularen Struktur und im Grad der Vernetzung unterscheiden[187].

Carbopol- Polymere werden als leichte, weiße, leicht säuerlich riechende Pulver angeboten. Die Pulver sind stark hygroskopisch. Es handelt sich um hochmolekulare Acrylsäurepolymere mit Molekulargewichten von 450.000 – 4.000.000[188]. Carbopol ist sehr

[181] Haller 1994, S. 7.
[182] Haller 1994, S. 24, Walch- von Miller 2003, S. 89.
[183] Walch- von Miller 2003, S. 58.
[184] s. Anhang, Datenblatt, Versuchsaufbau, BIOBRUSH, Italien.
[185] Eingetragenes Warenzeichen der Fa. BF Goodrich Chemical.
[186] Haller 1994, S. 37.
[187] Walch- von Miller 2003, S.86.
[188] Haller 1994, S.37.

leicht und ohne Klumpenbildung in Wasser dispergierbar. Durch den hohen Anteil an Carboxylgruppen entlang der Molekülketten ist das Molekül stark quellbar in Wasser.
In ungelöstem Zustand sind die Moleküle eng verknäult. Bei der Dispergierung wird das Molekül hydratisiert. Dabei dissoziiert es teilweise und beginnt sich zu entfalten. Damit kommt es zu einer Viskositätssteigerung. Der pH- Wert der wässrigen Dispersion liegt zwischen 2,5 und 3,5. Für eine beständige Viskosität ist die Neutralisation der Dispersion notwendig. Durch die Zugabe einer Base bildet die Säure ein Salz, welches das Polymer ionisiert. Die Ladungen veranlassen das Molekül weiter, sich zu strecken. Die Reaktion erfolgt sehr schnell und führt augenblicklich zur Verdickung der Suspension. Der pH- Wert der maximalen Verdickung liegt zwischen 6,5 und 9[189]. Als Empfehlung zur Lösung wird angegeben, 20 – 50 g in einen Liter Wasser einzustreuen, nach 2 bis 5 Minuten ist das Produkt benetzt. Durch einfaches Umrühren erhält man eine gleichmäßige Verteilung[190].
Carbopol wird weiterhin zur Herstellung von Textilhilfsmitteln, Farben, Polituren, Reinigungs- und Abbeizmitteln etc. verwendet[191].
Auch in der Restaurierung, vornehmlich in der Gemäldereinigung, wird Carbopol in Form von Kompressen, meist in sog. „Wolbers- Gelen“, seit Beginn der 90er Jahre genutzt. Vermehrt wird das Material in den letzten Jahren auch auf Steinsubstanz getestet und angewendet[192].

3. Alternativen zum Carbopol

In den Vorversuchen war festgestellt worden, dass Carbopol schwierig zu verarbeiten ist: Das Material ließ sich nur schwer gleichmäßig in der Bakteriensuspension verteilen, immer wieder kam es zu Klumpenbildung. Deshalb war die Paste kaum in einer gleichmäßigen Schichtdicke auf dem Stein aufzutragen. Sie haftete stark an der Objektoberfläche und ließ sich nach vollständigem Auftrocknen nur mechanisch entfernen. Die Überprüfung der Verwertbarkeit von Carbopol durch unterschiedliche Mikroorganismen hatte weiterhin ergeben, dass das Material von einer Vielzahl von Pilzen als Kohlenstoff- Quelle umgesetzt werden kann[193].
Im Rahmen der Vorversuche wurden daher verschiedene weitere Kompressenmaterialien auf ihre Verarbeitung und Eindringen in die Steinoberflächen untersucht. Organische Materialien wie Arbocel und reiner Zellstoff wurden nicht verwendet. Sie könnten als Nahrungsquelle für zahlreiche Mikroorganismen dienen.

[189] Haller 1994, S. 38.
[190] Kremer Pigmente Produktkatalog.
[191] Römpp Chemie Lexikon Version 1.0, Stuttgart 1995.
[192] Haake 2001, S. 2.
[193] Scheer 2005, S.53.

Die Steinoberflächen sollten mit verschiedenen Kompressenmaterialien behandelt werden, um mögliche Veränderungen durch gegebenenfalls verbleibende Reste der Kompressenmaterialien aufzuzeigen. Dies sollte durch Gewichtsvergleich vor und nach der Kompressenbehandlung und einen Tropfentest[194] erfolgen. Ziel war es, festzustellen, ob die unterschiedlichen Materialien rückstandsfrei von der Steinoberfläche zu entfernen sind. Führt eine restauratorische Maßnahme zur Verdichtung der Oberfläche, so kann es zu Folgeschäden wie Wasserstau und Verschiebung des Verdunstungshorizontes hinter die Steinoberfläche kommen. Daher wurde hier auch überprüft, ob eine Trennschicht zwischen Kompressenpaste und Steinoberfläche das Eindringen des Kompressenmaterials einschränkt.
Weiterhin galt es zu überprüfen, ob die Kompressen die Steinoberflächen in ihrer Wasseraufnahmefähigkeit und Wasserdampfdiffusion verändern.
Als Kompressenmaterialien wurden Attapulgit, Bentonit, Carbopol, Laponit und Meerschaumpulver (Sepiolith) ausgewählt, die als Verdickungsmittel für Lösemittel in der Konservierung / Restaurierung Verwendung finden[195].

4. Verwendete Kompressenmaterialien

Attapulgit, auch Floridin, ist eine Bleicherde zur Reinigung von Mineralöl, petrochemischen Produkten und Speiseöl. Es handelt sich um ein dem Meerschaum ähnliches Tonmineral mit teilweise zeolithisch gebundenem H_2O[196]. Es liegt in Pulver- und Granulatform vor. Attapulgit, ein kolloidales Magnesium- Aluminium- Hydrosilikat
$[(Mg,Al)_2\{OH\}Si_4O_{10})*2H_2O+2H_2O]$, dient als Ausgangsmaterial. Es hat einen pH-Wert von 7,5 bis 9,5[197]. Attapulgit wird im Kontakt- oder Einrührverfahren eingesetzt. Eine Empfehlung zu den Mischverhältnissen liegt nicht vor.
Bentonite sind sehr stark quellende Tone, die das 5 bis 6fache ihres Gewichtes an Wasser aufnehmen können und dabei ihren Rauminhalt verzehnfachen. Es handelt sich um verunreinigte Tone, die durch Verwitterung vulkanischer Tuffe entstanden sind[198]. Die starke Quellbarkeit und Absorbtionsfähigkeit der Bentonite ist auf einen hohen Gehalt an sehr kleinen ultramikroskopischen Teilen zurückzuführen[199].
Bentonit wurde 1916 in Kalifornien entdeckt. Es dient als Verdicker, als Zusatz von keramischen Massen, als Adsorptionsmittel, zur Weinschönung etc. Die Eigenschaften der Bentonite können dem Verwendungszweck entsprechend modifiziert werden. Als Mischverhältnis wird in Ölfarbe 1 – 5 % Bentonit angegeben.

[194] zur Erläuterung s. Kap. IV 6. Tropfenmessung, S. 68.
[195] Auras et.al. 1997, S. 697, Verges-Bemin 2003, S. 126.
[196] CD Römpp, Chemie Lexikon, Version 1.0 Stuttgart 1995.
[197] Kremer Pigmente Produktkatalog.
[198] CD Römpp, Chemie Lexikon, Version 1.0 Stuttgart 1995.
[199] Kremer Pigmente Produktkatalog.

Laponit ist ein Verdickungsmittel mit ausgeprägter Thixotropie für wässrige Systeme. Als synthetisches anorganisches Produkt wird es bereits bei der Herstellung gezielt mit den Eigenschaften ausgestattet, die für den jeweiligen Verwendungszweck erforderlich sind. Es ist ein weißes rieselfähiges Pulver, das in Wasser dispergiert ein Gel bildet und hat die Struktur eines Schichtsilikates[200]. Laponit wird vor allem für die Farbenherstellung genutzt. Es ist nahezu klar und zeigt keine Eigenfärbung. Der pH-Wert liegt bei 8,2[201]. Eine Empfehlung zu den Mischungsverhältnissen liegt nicht vor.

Bei Meerschaumpulver, auch Sepiolith, handelt es sich um ein natürliches Magnesium-Silikat. Es eignet sich als kolloidales, asbestfreies Thixotropierungs-, Schwebe- und Verdickungsmittel für wässrige Suspensionssysteme, hoch- und mittelpolare Lösemittel und Harz- und Polymersysteme. Meerschaum hat in einer 10%igen wässrigen Suspension einen pH-Wert von 8,8[202]. Das Material findet bei der Reinigung von Gipsplastiken Verwendung[203] und wurde bereits im Zusammenhang mit Biokompressen eingesetzt[204]. Meerschaumpulver enthält einen hohen Anteil von unerwünschten Ionen und Spurenelementen, deren Schadenspotential beim Einsatz in der Konservierung und Restaurierung kritisch bewertet werden muss[205].

Die Materialien wurden für je vier Probewürfel mit aqua dest. zubereitet und auf die Steinoberflächen appliziert. Für den besten Auftrag wurden dabei folgende Mischverhältnisse ermittelt:

Material	Menge Kompresse	Menge aqua dest.
Attapulgit	20 g	40 ml
Bentonit	20 g	40 ml
Carbopol	2 g	40 ml
Laponit	10 g	40 ml
Meerschaumpulver	20 g	60 ml

Tabelle 5 Mischungsverhältnisse der Kompressen

[200] Haller 1994, S. 33.
[201] Kremer Pigmente Produktkatalog, Haller 1994, S. 33.
[202] Kremer Pigmente Produktkatalog.
[203] Schulz 1992, S. 83.
[204] Ranalli et. al. 2000, S. 231.
[205] Ranalli et.al. 2000, S.231.

5. Versuchsdurchführung

Probekörper aus Obernkirchener Sandstein mit einer Kantenlänge von 4 x 4 x 4 cm wurden für 5 Tage im Exsikkator bis zu einem konstanten Gewicht gelagert. Dieses Gewicht wurde als Ausgangsgewicht vor Versuchsbeginn ermittelt. Jeweils vier Steinwürfel wurden mit demselben Kompressenmaterial behandelt. Es wurde auf unterschiedlichen Wegen auf den Würfeln appliziert:

Behandlung	Attapulgit	Bentonit	Carbopol	Laponit	Meerschaump.
eine Trennschicht auf der Kompressenpaste	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel
eine Trennschicht Japanpapier unter Kompressenpaste	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel
Japanpapier unter und über Kompressenpaste	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel
Zellstoff unter und über Kompressenpaste	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel	1 Würfel

alle mit Abdeckung aus PE- Folie

Tabelle 6 Behandlung der Würfel mit unterschiedlichen Kompressen

Ein Würfel jeder Reihe wurde ohne Trennschicht direkt mit der Kompresse versehen. Die übrigen drei Steinwürfel erhielten eine Trennschicht, die mit aqua dest. per Pinsel auf der Steinoberfläche appliziert wurde. Diese bestand bei einer Würfelreihe aus Zellstoff, bei den anderen beiden aus Japanpapier. Sie kann die bei der Nachreinigung zu entfernenden Rückstände auf ein geringes Maß reduzieren[206]. Auf die Trennschicht wurde das Kompressenmaterial gegeben und mit einem Spachtel vorsichtig zu einer Schichtdicke von 3-5 mm angedrückt. Bei den Würfelreihen ohne Trennschicht zwischen Stein und Paste, mit Zellstoff sowie einer Reihe mit Japanpapier wurde anschließend eine weitere Lage Zellstoff bzw. Japanpapier aufgetragen, um ein Nachnässen zu ermöglichen. Alle Würfel wurden mit PE- Folie abgedeckt, die mit einem Gummiband auf dem Stein fixiert wurde.
Die Kompressen blieben drei Tage bis zur vollständigen Auftrocknung auf den Würfeln. Alle Kompressen wurden, soweit möglich, mehrfach nachgenässt. Anschließend wurden die Kompressen abgenommen und die Oberflächen vorsichtig mit aqua dest. und einer weichen Bürste nachgereinigt. Es folgte ein Tropfentest. Eine weitere Beprobung der Steinoberflächen erfolgte 10 Tage nach Abnahme der Kompressen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Steinwürfel vollständig getrocknet.

Bereits bei der Vorbereitung der Kompressen zeigte sich, dass die Bestandteile der Carbopol-, Laponit- und Bentonit- Kompressen manuell nur schwer zu einer homogenen Masse zu verrühren waren. Die Paste klebte stark an dem Spachtel und blieb trotz intensiven Umrührens eher klumpig. Beim Auftrag auf die Steinoberflächen hafteten diese

[206] Haller 1994, S. 55.

Materialien stärker am Spachtel, so dass die trennende Zellstoff- bzw. Japanpapierschicht oftmals zerriss. Im Gegensatz dazu präsentierten sich die Pasten aus Meerschaumpulver und Attapulgit sehr homogen. Sie waren weich und ließen sich gleichmäßig in der gewünschten Stärke auf den Würfeloberflächen applizieren.

Abb. 23 und 24 Bentonit, Carbopol, Laponit, Attapulgit und Meerschaumpulver
links direkt nach Auftrag und rechts einen Tag später

Nach einem Tag erschienen die Kompressen auf allen Steinwürfeln weich und formbar. Die Attapulgit-, Bentonit-, und Meerschaumpulverkompressen hatten sich geringfügig zusammengezogen und zeigten leichte Schwundrisse, die jedoch mit dem Spachtel oder manuell gut zu verschließen waren. Durch die Zellstofflage auf der Paste konnten die Oberflächen immer wieder nachgenässt werden. Am wenigsten verändert erschien die Carbopol- Kompresse, die weiterhin klebrig und weich blieb.
Auch nach zwei Tagen waren alle Kompressenmaterialien noch formbar, allerdings zeigten sich leichte Schwundrisse in den Attapulgit- und Meerschaumpulverkompressen, vor allem bei den Würfeln ohne zweite, abdeckende Zellstofflage. Die Bentonit- Kompresse hatte sich vom Untergrund gelöst und stand an den Seiten bis zu 2 mm hoch. Die Laponit- Kompresse war sehr hart und wachsartig und partiell ebenfalls leicht angerissen. Sie war selbst mithilfe der aufliegenden Zellstoffpapierlage nicht mehr nachzufeuchten. Auch zu diesem Zeitpunkt erschien die Carbopol- Kompresse weitgehend unverändert.
Die PE- Folie schränkte die Verdunstung des Wassers etwas, aber nicht vollständig ein. Das Nachnässen zeigte vor allem bei der Carbopol- Kompresse positive Wirkung, die anderen Materialien waren nach zwei Tagen bereits zu sehr aufgetrocknet. Ein vollständiges Absperren der Oberflächen gegen Einflüsse von außen erscheint nicht möglich.
Die Kompressen erschienen am folgenden dritten Tag nahezu unverändert. Die Carbopol-Kompresse war weiterhin pastenartig und klebrig und immer wieder durch erneutes Nachnässen anzulösen. Die Kompressen ohne zweite Zellstofflage auf der Paste unterschieden sich optisch nur unwesentlich von denen mit zweiter Zellstofflage. Allerdings

waren sie etwas schneller aufgetrocknet und hatten damit stärker die Haftung und den Kontakt zum Untergrund verloren.
Alle Kompressen waren nach drei Tagen leicht von der Oberfläche abzunehmen. Die untere Zellstofflage hatte als Trennschicht fungiert. Dagegen erschien es vor allem bei dem feuchterückhaltenden Carbopol schwierig, die Kompresse ohne Trennschicht von der Oberfläche zu entfernen.
Die Verwendung von Japanpapier statt Zellstoff bei der dritten Würfelreihe erschien wegen der Empfindlichkeit des Zellstoffes sinnvoll. Das Japanpapier ist etwas stärker und reißt weniger schnell. Es ließ sich leicht mit aqua dest. auf den Steinoberflächen fixieren.
Weitere Unterschiede in der Anwendung von Zellstoff und Japanpapier konnten nicht ermittelt werden. Auch mit Japanpapier als Trennschicht unter den Kompressenpasten konnten die Pasten leicht entfernt werden. Die Oberflächen zeigten optisch keine Veränderungen. Die Verwendung von Japanpapier schien als Abdeckschicht zur Erleichterung der Durchfeuchtung ebenso geeignet wie Zellstoff.
Die Würfel, bei denen auf eine Trennschicht aus Zellstoff oder Japanpapier verzichtet worden war, unterschieden sich nach ein und zwei Tagen optisch nicht von den übrigen Steinwürfeln. Durch die oben aufliegende Japanpapierlage konnten auch sie regelmäßig nachgenässt werden. Alle Materialien hafteten an den Steinoberflächen.
Die Kompressenmaterialien ließen sich nach drei Tagen mithilfe eines Spachtels leicht von den Würfeln entfernen. Die Oberflächen wurden anschließend mit aqua dest und einem weichen Pinsel von den optisch erkennbaren Rückständen befreit.
Um die mögliche Verdichtung der Steinoberflächen zu überprüfen, wurden alle mit Kompressen behandelten Steinoberflächen anschließend einem Tropfentest unterzogen. Ebenso wurden an unbehandelten Steinen Referenzuntersuchungen durchgeführt.

6. Tropfenmessung

Mit Hilfe eines einfachen Tropfentests, der entsprechend der Diplomarbeit von Heiling durchgeführt wurde[207], wurde die Veränderung der kapillaren Wasseraufnahme der Würfeloberflächen ermittelt. Der Versuch, der in der Regel für die Prüfung von Hydrophobierungsmitteln verwendet wird, sollte nachweisen, ob die verwendeten Kompressenpasten zu einer Verdichtung der Oberflächen geführt haben. Generell sind Folgeschäden nach der Behandlung mit Lösemittelgelen, zumindest in der Holzrestaurierung, nicht bekannt[208]. Sollte sich nach dem Entfernen der Pasten eine Veränderung der Steinoberflächen ergeben, so sollte die Applikation dieses Materials aus Sicht des Restaurators möglichst vermieden und nach einem Alternativmaterial gesucht

[207] Heiling 2003, S. 95.
[208] Walch- von Miller 2003, S. 58.

werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Zeit gemessen, in der ein Tropfen vollständig in die Oberfläche eindringt. Gleichzeitig wurde der Durchmesser des Tropfens bestimmt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde für alle Versuche dieselbe Pipette mit einem Tropfenvolumen von 0,03 ml verwendet. Jeder Steinwürfel wurde dreifach beprobt und mit den Ergebnissen für unbehandelte Natursteinoberflächen desselben Materials verglichen. Der Versuch wurde einmal direkt nach Entfernung der Kompressen sowie 10 Tage später durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 im Anhang zusammengefasst.

Auf allen mit Kompressenpasten behandelten Steinoberflächen blieb der Tropfen nicht als „Perle“ stehen, sondern breitete sich relativ schnell aus.

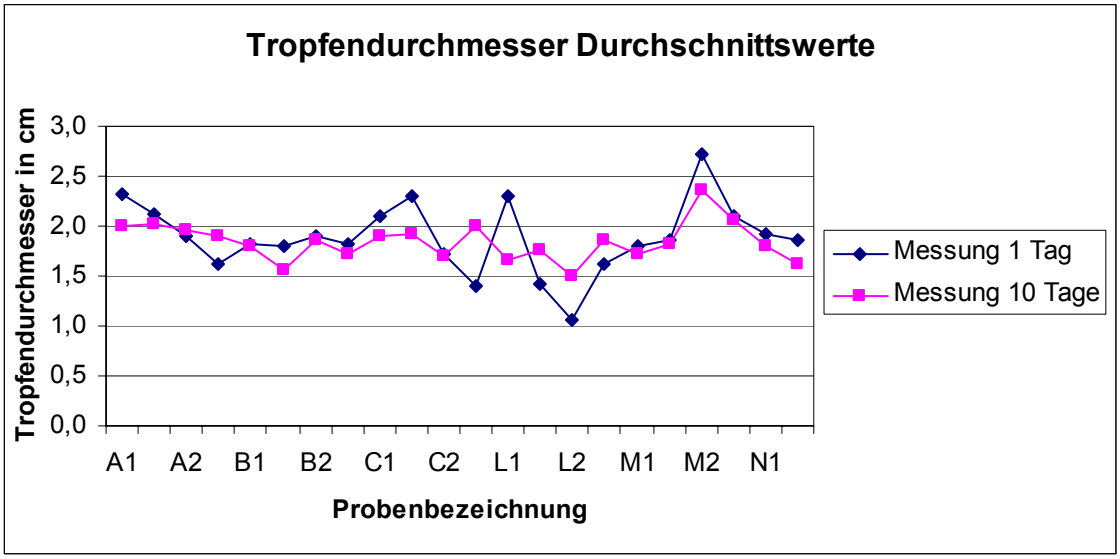


Abb. 25 Tropfendurchmesser Durchschnittswerte

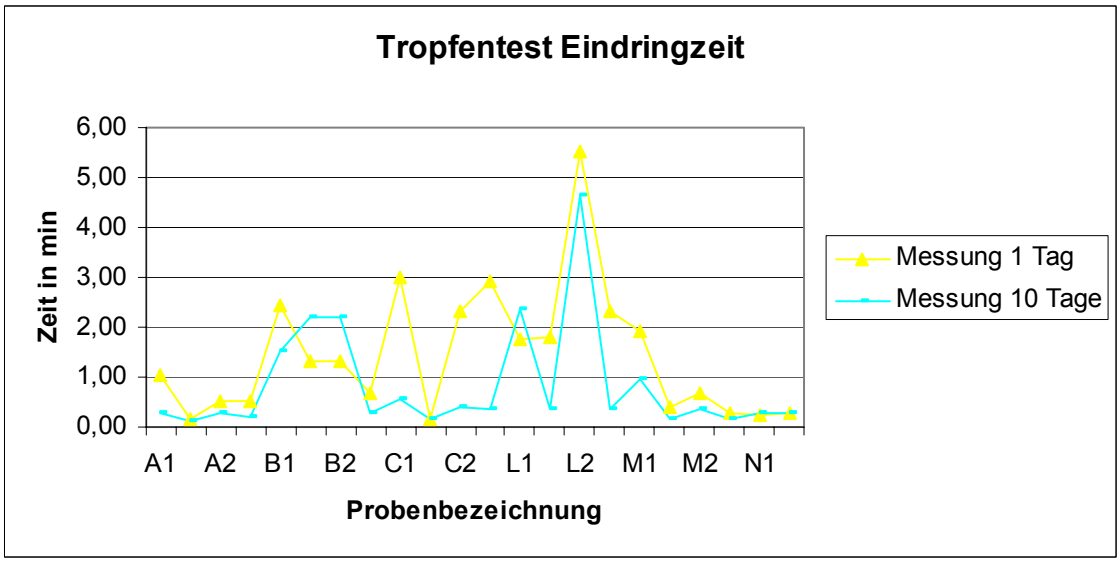


Abb. 26 Tropfentest Eindringzeit Durchschnittswerte

Die unterschiedlichen Kompressenmaterialien werden jeweils mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt.

Die Tropfendurchmesser auf den unterschiedlich behandelten Steinoberflächen schwankten dabei zwischen 0,7 (Laponit) und 3,2 cm (Meerschaumpulver) direkt nach Abnahme der Kompressen und zwischen 1,4 (Laponit) und 2,4 cm (Meerschaumpulver) nach 10 Tagen.
Die Dauer des Eindringens des Tropfens in die Würfeloberfläche schwankte ebenfalls stark zwischen 9 min (Laponit) und 15 sec (Carbopol) direkt nach der Behandlung und etwa 8 min (Laponit) und 22 sec (Attapulgit) nach 10 Tagen. Dabei war durchaus ein Bezug zwischen geringem Tropfendurchmesser und langer Eindringzeit zu beobachten. Umgekehrt wurde die größte Ausdehnung des Tropfens bei mittlerer Dauer (um 1 min) erreicht. Die Werte der unbehandelten Oberflächen lagen bei Durchmesser 1,84 und etwa 1 min.

Nr. Probe	Tropfen- Ø in cm	Tropfen- Ø In cm	Eindring- zeit in min	Eindring- zeit in min
	nach Abnahme	nach 10 Tagen	nach Abnahme	nach 10 Tagen
A1	2,33	2,00	1,06	0,29
A1	2,13	2,03	0,18	0,12
A2	1,90	1,97	0,52	0,30
A2	1,63	1,90	0,51	0,20
B1	1,83	1,80	2,44	1,53
B1	1,80	1,57	1,32	2,20
B2	1,90	1,87	1,31	2,18
B2	1,83	1,73	0,69	0,30
C1	2,10	1,90	2,99	0,56
C1	2,30	1,93	0,18	0,14
C2	1,73	1,70	2,32	0,41
C2	1,40	2,00	2,94	0,35
L1	2,30	1,67	1,76	2,36
L1	1,43	1,77	1,81	0,36
L2	1,07	1,50	5,53	4,66
L2	1,63	1,87	2,32	0,36
M1	1,80	1,73	1,94	0,96
M1	1,87	1,83	0,39	0,14
M2	2,73	2,37	0,69	0,36
M2	2,10	2,07	0,28	0,14
N1	1,93	1,80	0,23	0,28
N2	1,87	1,63	0,30	0,29

Tabelle 7 Durchschnittswerte Tropfendurchmesser und Eindringzeit (N= unbehandelt)

Die Ergebnisse der Tropfenmessungen zeigten bei allen Materialien leichte bis starke Schwankungen. Der unbehandelte Obernkirchener Sandstein wies im Mittel einen Tropfendurchmesser von 1,84 cm auf, der Tropfen verschwand im Mittel in etwa einer Minute von der Oberfläche. Dies lässt auf ein sehr offenporiges Gefüge schließen, dessen Oberfläche in keiner Form versiegelt ist.
Ein zu der unbehandelten Oberfläche vergleichbares Ergebnis lieferte die mit Meerschaumpulver behandelte Oberfläche, gefolgt von der Bentonit- Kompresse[209]. Die Ergebnisse der mit Laponit behandelten Oberflächen wichen mit deutlich unter bzw. über diesen Werten liegenden Ergebnissen am intensivsten vom Vergleichsmaterial ab.
In Bezug auf die Zeit zeigte die mit Attapulgit behandelte Oberfläche das beste Ergebnis, gefolgt von Meerschaumpulver. Die mit diesen Materialien behandelten Oberflächen erschienen kaum verdichtet, so dass der aufgegebene Wassertropfen innerhalb kürzester

[209] s. Anhang, Tabelle 7, Tropfenmessung.

Zeit absorbiert werden konnte. Das Material Carbopol lag bei den Untersuchungen im tolerierbaren, aber nicht oberen Bereich.
Insgesamt erschien nach dem Auswerten des Tropfentests Meerschaumpulver am besten für Kompressen auf der Sandsteinoberfläche geeignet. Sowohl in punkto Tropfenausdehnung als auch in Bezug auf die Eindringzeit zeigte das Material gute Ergebnisse, die relativ nah an den Werten der unbehandelten Steinoberfläche liegen. Das Material war leicht zu einer homogenen Paste anzurühren und ließ sich sehr gut verarbeiten und auf der Steinoberfläche applizieren. Allerdings zeigte Meerschaumpulver bei der Applikation eine schnellere Austrocknung als Carbopol. Es konnte durch Nachnässen nicht wieder angelöst werden. Die Paste erschien weiterhin sehr dicht, was die Aktivität der Bakterien innerhalb der Kompresse erheblich einschränken dürfte.

Festgehalten werden muss auch, dass es zu einer Veränderung der Steinoberflächen bei allen verwendeten Materialien kam. Die Rückstände der Pasten verschlossen die Poren und Kapillaren des Steinmaterials. Die Wasseraufnahme und vermutlich auch die Wasserdampfdiffusion sind dadurch verringert. Für Carbopol- Kompressen ist zusätzlich eine mögliche Farbveränderung der Oberflächen belegt[210], da die Gelrückstände oxidieren und dabei vergilben[211]. Dies lässt vermuten, dass langfristig auch eine schnellere Wiederverschmutzung erfolgen wird, da die Reste des Gels klebende Wirkung haben.
Der Stein selbst wird sehr wahrscheinlich nicht durch die Gelrückstände in Mitleidenschaft gezogen, verwittern oder zu Schaden kommen. Durch die Veränderung der physikalischen Eigenschaften ist jedoch eine Schädigung auf lange Sicht nicht auszuschließen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit finden keine chemischen Reaktionen zwischen der anorganischen Steinsubstanz und den Gelrückständen statt[212]. Es konnte aber nachgewiesen werden, dass Carbopol ein Substrat darstellt, das von verschiedenen Mikroorganismen, vorzugsweise verschiedenen Pilzen, als Nahrungsgrundlage genutzt und umgesetzt werden kann[213]. Damit entsteht hier ein erhöhtes Schadenspotential.
Die mögliche Farbintensivierung, die durch eine Behandlung mit Carbopol zumindest bei porösen Baustoffen wie Sandstein erfolgen kann, stellt aus restauratorischer Sicht eine Einschränkung der Ablesbarkeit der Architekturaussage und damit eine Beschädigung des Kunstobjektes dar.

[210] Haake 2001, S. 57.
[211] Schwarz / Levy 1958, S. 442, Goodrich 1997, S.2
[212] Haake 2001, S. 58.
[213] Scheer 2005, S. 52.

7. Gewichtsvergleich

Um zu ermitteln, ob es durch die Kompressenbehandlung zu einer gravimetrischen Veränderung der Probekörper kommt, wurden erneut Probekörper mit Kompressen versehen. Dazu wurden jeweils zwei Würfel identisch behandelt (z.B. A1 und A2). Das Gewicht der Probewürfel wurde vor und nach der Kompressenbehandlung erfasst. Der Versuch wurde zweimal durchgeführt.

Ein Vergleich des vor und nach der Kompressenbehandlung ermittelten Gewichtes der beprobten Steinwürfel zeigte, dass es in fast allen Fällen zu einer leichten Gewichtsabnahme der Steinwürfel gekommen war. Der Gewichtsverlust lag im Durchschnitt bei 0,0185 g, also sehr gering. Er ist nicht unbedingt auf die Salzreduzierung durch die Neutralkompresse zurückzuführen, vielmehr kann auch die mechanische Abnahme der Kompresse zu diesem Gewichtsverlust geführt haben. Der Eintrag an Fremdmaterial bzw. die Wirksamkeit der Kompressenentsalzung scheint gravimetrisch nicht ermittelbar.

Stein 25.07.	vor Kompresse	nach Trocknen	Differenz	Stein 11.08.	vor Kompresse	nach Trocknen	Differenz
A1	160,560	160,536	-0,002	A1	146,248	146,219	-0,029
A2	160,792	160,768	-0,024	A2	146,434	146,393	-0,041
B1	160,186	160,174	-0,012	B1	147,106	147,093	-0,013
B2	161,449	161,451	0,002	B2	141,792	141,747	-0,045
C1	160,324	160,315	-0,009	C1	147,502	147,494	-0,008
C2	161,434	161,429	-0,005	C2	147,449	147,440	-0,009
L1	161,165	161,165	0,000	L1	140,622	140,595	-0,027
L2	161,185	161,177	-0,008	L2	147,043	146,999	-0,044
M1	161,035	161,019	-0,016	M1	145,856	145,830	-0,026
M2	161,251	161,236	-0,015	M2	148,357	148,315	-0,042
		Ø	**-0,009**			**Ø**	**-0,028**

Tabelle 8 Gewicht der Steinwürfel vor und nach der Kompressenbehandlung
Die unterschiedlichen Kompressenmaterialien werden jeweils mit ihrem Anfangsbuchstaben abgekürzt

Das Verwenden einer Trennschicht aus Zellstoff bzw. Japanpapier hat den intensiven Eintrag des Kompressenmaterials in das Korngefüge unterbunden. Das Entfernen der Kompressen wurde dadurch, wie bei U. Haller beschrieben, erheblich erleichtert[214], die Haftung der Kompresse am Stein war dennoch gewährleistet.

Es erscheint sinnvoll, eine solche Trennschicht auch am Objekt aufzubringen. Zu berücksichtigen ist zusätzlich, dass es sich bei den Probewürfeln um frisch gesägtes Steinmaterial mit einer ebenen Oberfläche handelt. Durch Krusten gekennzeichnete

[214] Haller 1994, S.55.

Steinoberflächen haben meist ein sehr raues und profiliertes Oberflächenerscheinungsbild, von dem Pasten sehr schwer zu entfernen sind.

Durch einen Parallelversuch, bei dem Bakteriensuspension durch Japanpapier filtriert wurde, konnte bestätigt werden, dass die Bakterien in der Lage sind, das Japanpapier ohne weiteres zu überwinden. Es kam zu keiner Anreicherung der Zellen vor dem Filter, nur wenige Bakterien konnten auf dem Japanpapier nachgewiesen werden. Dagegen wurden größere Partikel aus dem Medium durchaus von der Zellstoffschicht aufgehalten, so dass diese zusätzliche Trennschicht zwischen Carbopol- Kompresse und Bauwerksoberfläche für die Applikation der Biokompressen als positiv zu bewerten ist.
Dennoch kam es bei allen beprobten Steinwürfeln zu einer Veränderung der Benetzbarkeit der Oberfläche und damit auch zu einem veränderten Wasseraufnahmevermögen.
Wenn möglich sollte die Verwendung von Kompressenpasten so eingeschränkt wie möglich erfolgen, da etwaige Spätfolgen (Wasserstau etc.) nicht kalkuliert werden können.
Wegen der schnellen Auftrocknung der alternativen Kompressenmaterialien wurde nach diesem Vorversuch von einem Einsatz eines anderen Materials als Carbogel abgesehen, da dieses am besten geeignet erschien.

Möglicherweise hängen die teilweise erheblich von dem Ursprungsgestein abweichenden Ergebnisse der Tropfentests mit der Nachreinigung der Oberflächen zusammen. Diese stellt einen wichtigen Aspekt bei der Verwendung von Gelen dar, da sie eine möglichst rückstandsfreie Oberfläche hinterlassen soll. Bei der Verwendung von Lösemittelgelen wie Carbopol- Wasser- Mischungen besteht ein erhöhtes Risiko an im Gefüge von rauen Oberflächen verbleibenden Resten des Acrylats[215]. Für die sachgemäße Nachreinigung muss ein geeignetes Lösemittelgemisch ermittelt werden, möglichst entsprechend den Lösemitteln, die verdickt auch im Gel vorliegen[216]. Daher wurde hier mit einer weichen Bürste und aqua dest. nachgereinigt.
Allgemein wird davon ausgegangen, dass bei gründlicher Nachreinigung die Acrylate zumindest von relativ glatten Oberflächen gut zu entfernen sind[217]. Inwieweit Rückstände vollständig von unebenen rauen Oberflächen abgenommen werden können, war auch durch Überprüfung der Oberflächen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie nicht eindeutig zu ermitteln[218]. Es wurde jedoch nachgewiesen, dass poröses Material deutlich mehr Gelrückstände im Gefüge aufweist als dichte Oberflächen[219]. Daher wird von einer

[215] Burnstock / White 1990, S. 36ff.
[216] Haller 1994, S. 51.
[217] Haller 1994, S. 57.
[218] Burnstock / White 1990, S. 38.
[219] Haake 2001, S.57.

Verwendung auf porösen, rauen, kapillar wirksamen Oberflächen abgeraten. Der Aufwand der Nachreinigung steht in keinem Verhältnis zu der Gelreinigung selbst[220]. Möglicherweise sollten für die Nachreinigung und vollständige Entfernung der Kompressenreste auch Alternativen wie Testbenzinmischungen[221] untersucht werden.

8. Verhalten der Bakterien innerhalb unterschiedlicher Kompressenmaterialien

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Untersuchung und Auswahl geeigneter Kompressenmaterialien war, ob und wie lange die Bakterien in den Kompressenmaterialien überleben. Die Kompressenmaterialien Attapulgit und Meerschaumpulver hatten bei dem Tropfentest akzeptable Ergebnisse erreicht. Weiterhin sprach ihre gute Verarbeitung für diese Materialien. Sie schufen einen dichten Film auf der Oberfläche und waren leicht wieder zu entfernen. Carbopol zeigte die langsamste Auftrocknung. Die anderen geprüften Materialien zeigten eine unregelmäßige aber starke Verdichtung der Oberfläche, welche aus restauratorischer Sicht möglichst vermieden werden sollte.

Die Kompressenmaterialien wurden mit beimpftem Medium (Zelldichte 10^8 Zellen/ml, >90% grün fluoreszierende Bakterien) zubereitet. Zum Einsatz kamen dabei die im Rahmen des Tropfentests bereits zuvor untersuchten Kompressenmaterialien, wobei besonders die Materialien beobachtet wurden, die in der Verarbeitung und in den Auswirkungen auf die Steinoberflächen bessere Ergebnisse als das Carbogel erzielt hatten. Es wurden Kompressen mit Bentonit, Attapulgit, Meerschaumpulver und Laponit sowie zum Vergleich wiederum mit Carbogel zubereitet. Die Kompressenpasten wurden auf jeweils zwei Steinwürfel appliziert. Dazu wurden die Steinoberflächen zunächst mit einer Lage Zellstoff versehen, diese mit beimpftem Medium angefeuchtet. Darauf wurde die Kompressenpaste gegeben und in einer Schichtdicke von etwa 3 bis 5 mm glatt gestrichen. Auf die Oberfläche wurde wiederum eine Lage Japanpapier gegeben, dieses ebenfalls angefeuchtet und die gesamte Kompresse mit Folie abgedichtet. Die Kompressen wurden innerhalb der ersten 3 Tage einmal täglich nachgefeuchtet. Nach 1, 2 und 3 Tagen wurden jeweils kleine Proben der Kompressenpasten entnommen, mit Baclight angefärbt und unter UV- Licht die Aktivität und der Keimgehalt bewertet.

In allen untersuchten Materialien waren die Bakterien nur sehr schwer nachzuweisen, da alle Materialien eine intensive Eigenfluoreszenz zeigten. Die Anzahl der Bakterien konnte deshalb nur geschätzt werden, ebenso wie der Anteil an grün fluoreszierenden Zellen.

[220] Haake 2001, S. 59.
[221] Haller 1994, S. 51.

Im Bentonit, Attapulgit und Laponit konnten nur wenige Zellen beobachtet werden, die durchweg keine Bewegung zeigten. Da Bentonit und Laponit stark rot fluoreszierten, konnten tote Sulfatreduzierer nur partiell identifiziert werden. Der Anteil an grün fluoreszierenden Mikroorganismen wurde daher auf etwa 50% geschätzt. Die Zelldichte lag bei den drei Materialien im geringen Bereich.
Meerschaumpulver zeigte noch deutlich weniger nachweisbare Bakterien, die Eigenfluoreszenz des Materials schwankte von grün über orange bis tiefrot. Die Bakterien in der Carbopol- Kompresse waren trotz der starken grünen Eigenfluoreszenz des Materials am deutlichsten erkennbar. Hier konnten zahlreiche lebendige Zellen in hoher Zelldichte bei partieller Bewegung nachgewiesen werden.
Grün fluoreszierende Bakterien waren in allen Materialien erkennbar, da sie viel intensiver als die Paste fluoreszierten. Die roten Bakterien hoben sich dagegen nur unwesentlich vom Untergrund ab, so dass ihre Zahl nicht genau zu ermitteln war.

Lebensdauer von Bakterien im Kompressenmaterial

Datum	Bentonit	Attapulgit	Laponit	Meerschaumpulver	Carbopol
Eigenfluoreszenz	rot-grün	grün	rot-grün	orange	schwach
Anzahl Bakterien	wenig	wenig	wenig	minimal	zahlreich
20.08.	50% lebend	50% lebend	50% lebend	100% lebend	100% lebend
21.08.	>80% lebend	>80% lebend	>80% lebend	>80% lebend	100% lebend
24.08.	50% lebend	100% lebend	50% lebend	>90% lebend	100% lebend

Tabelle 9 Lebensdauer der Bakterien der Spezies Vulgaris in verschiedenen Kompressenmaterialien

Die Kompressenmaterialien Attapulgit, Bentonit, Laponit und Meerschaumpulver stellen nach dem Vorversuch keine Alternative zu dem im Rahmen des BIOBRUSH- Projektes genutzten Carbopol dar. In allen vier Materialien konnten nur in geringen Mengen Bakterien nachgewiesen werden. Der Anteil lebender Zellen lag bei 50% gegenüber 100% beim Carbopol. Alle Materialien weisen eine hohe Eigenfluoreszenz auf, so dass in dem Kompressenmaterial vorhandene Bakterien nur eingeschränkt erkennbar sind. Die schnelle Auftrocknung, die bereits im Vorversuch festgestellt worden war, würde die Wirksamkeit der Bakterien weiter einschränken.

9. Ergebnis

Um geeignete Kompressenmaterialien zu ermitteln, wurden verschiedene Untersuchungen an gebräuchlichen Systemen durchgeführt. Hierfür wurden Attapulgit, Bentonit, Carbopol, Laponit und Meerschaumpulver auf Steinwürfel appliziert. Dabei kamen verschiedene Techniken und Methoden zum Einsatz. Festgestellt wurde zunächst, dass sich eine Trennschicht zwischen Stein und Kompressenpaste positiv auf die Entfernbarkeit der

Kompresse auswirkt. Es verbleiben keine erkennbaren Rückstände auf den Oberflächen. Auch das Abdecken mit einer Schicht Japanpapier erwies sich als sinnvoll für die Nachfeuchtung der Pasten und ermöglichte damit eine längere Haftungs- und Wirkungszeit. Dennoch trockneten Attapulgit, Bentonit, Meerschaumpulver und Laponit relativ schnell auf.
Der Tropfentest ergab für alle behandelten Steinoberflächen Veränderungen in der Wasseraufnahmefähigkeit. Dabei lieferte Meerschaumpulver das beste Ergebnis. Die Untersuchungen ergaben für alle Materialien stark schwankende Ergebnisse.
Die Gewichtsermittlung der Probekörper vor und nach der Kompressenbehandlung zeigte nur minimale Veränderungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass nur minimale Mengen der Kompressenpasten im Gefüge verbleiben. Sie spielen gravimetrisch keine Rolle.
Die abschließende Untersuchung zur Verhalten der sulfatreduzierenden Bakterien innerhalb der unterschiedlichen Kompressen ergab nur für Carbopol ein ansprechendes Ergebnis. In der Carbopol- Paste konnten hohe Zelldichten mit einen großen Anteil an lebendigen Zellen nachgewiesen werden, während die übrigen Materialien nur wenige Bakterien zeigten.
Das im Rahmen des Projektes „BIOBRUSH“ eingesetzte Carbopol lag bei Versuchen im mittleren und damit tolerierbaren Bereich. Die Bakterien zeigten in der Carbopol- Paste die höchsten Zelldichten.
Nach Abwägung verschiedener Kriterien erscheint die Anwendung von Carbopol als Applikationspaste für die Bakteriensuspension am besten geeignet.

10. Alternative Foliensysteme

Als Alternative zu der Carbopolkompresse boten sich weiterhin textile Foliensysteme an, die im Rahmen des Projektes Biokompresse zur Applikation von Nitratverwertern getestet und für tauglich befunden worden waren.
Textile Produkte aus synthetischen Polymeren wurden als inerte Träger von Mikroorganismen getestet[222]. Sie weisen eine große innere Oberfläche sowie eine hohe biologische Beständigkeit auf, verhalten sich neutral gegenüber biologischen Prozessen und sind kostengünstig[223].
Die für den Einsatz von Nitratverwertern entwickelten Kompressenfolien aus zwei- und dreischichtiger PP- Folie bestehen aus einem Nadelvlies auf Basis von Polypropylen oder anderen Polymeren, das als Reaktions- und „Entsalzungsschicht“ fungiert. Die Fasereinheit beträgt 1,7 bis 6,7 dtex bei einer Faserlänge von 38-40 mm[224]. Die „Entsalzungsschicht“ ist durch ein hohes Feuchtetransportvermögen gekennzeichnet und gewährleistet die Sicherung eines ausreichenden Feuchtemilieus für die Bakterien.

[222] Weiß- Quasdorf 2005, S. 39.
[223] ebd.
[224] Weiß-Quasdorf 2005, S.43.

Beide Kompressentypen sind weiterhin mit einer Schutzschicht versehen, die aus einer einfachen, wasserundurchlässigen Polypropylen- Folie besteht. Um einen Feuchtetransport durch die Folie zu ermöglichen, ist diese perforiert und gedochtet. Mit Hilfe der Vernadelungstechnik sind Faserbüschel des Nadelvlieses durch die Folie gestochen. Diese gewährleisten einen guten Feuchtetransport, heben aber gleichzeitig die generelle Sperrfunktion der Folie nicht auf[225]. Die Schutzschicht stellt einen Schutz der Reaktions- und „Entsalzungsschicht“ vor umweltbedingten Einwirkungen dar, gewährleistet die anaeroben Bedingungen für die Mikroorganismen, regelt den Feuchttransport nach außen und verbessert die mechanische Stabilität der Reaktions- und „Entsalzungsschicht“[226].
Die dreischichtige Kompressenfolie ist zusätzlich auf der gegenüberliegenden Seite mit einer Kontaktschicht versehen. Sie besteht aus einer einfachen, wasserundurchlässigen Polypropylen- Folie, die wie die Schutzschicht durch Dochtung mit dem Nadelvlies verbunden ist. Die Kontaktschicht stellt einen Schutz des Mauerwerks vor Rücknässung sowie eine Barriere gegen Mikroorganismen dar, Sie fungiert weiter als Verdunstungs- und Kristallisationshorizont, Träger der Mikroorganismen sowie als Salzumwandlungs- und Salzabbaureaktionsschicht[227].
Die vorliegenden Kompressen zeichnen sich nach Aussage des Herstellers durch eine hohe Beständigkeit gegenüber Salzen, Mikroorganismen und Umwelteinflüssen aus und zeigen keine Abbauerscheinungen während der Dauer des Einsatzes. Darüber hinaus sind sie mehrfach einsetzbar, gewährleisten die Transportvorgänge vom Mauerwerk in die Kompresse und stellen einen wirksamen Schutz vor Rücknässung dar[228].
Von der Firma Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff- Forschung e.V. wurden für die Versuche vier verschiedene Foliensysteme zur Verfügung gestellt:

1. PP- Folie / PP- Vlies leicht einseitig gedochtet (4 Dochte / cm²)
2. PP- Folie / PES- Vlies schwer / PP- Folie beidseitig gedochtet (4 Dochte / cm²)
3. PP- Folie / PP- Vlies leicht einseitig gedochtet (6 Dochte / cm²)
4. PP- Folie / PP- Vlies leicht einseitig gedochtet (10 Dochte / cm²)

[225] Weiß-Quasdorf 2005, S.45/46.
[226] Weiß- Quasdorf 2005, S. 42.
[227] ebd.
[228] Weiß-Quasdorf 2005, S.53.

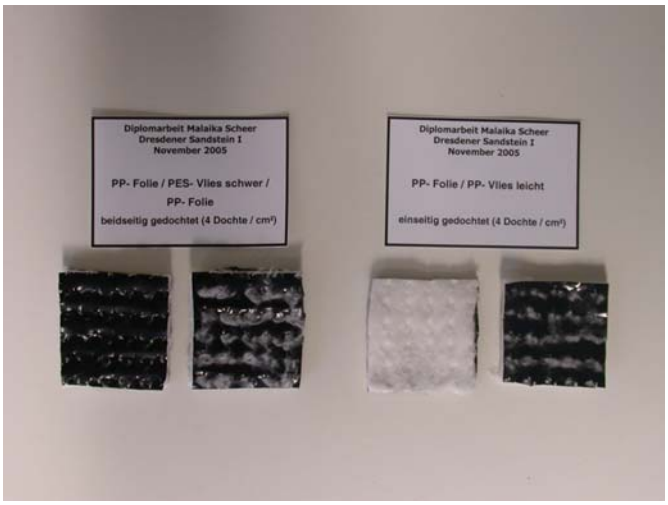


Abb. 27 Foliensysteme aus dem Projekt Biokompresse, links dreischichtig, rechts zweischichtig

Für die Durchführung der Bakterienapplikation am Objekt wurden die beiden Systeme 1 und 2 ausgewählt, da sich im Rahmen der Versuche am Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoff- Forschung e.V. Folien mit 4 bis 6 Dochten als Optimum für gute Haftung und sehr gute Transport- und Rücknässbarriereeigenschaften erwiesen hatten[229]. Weitere Voruntersuchungen zur Tauglichkeit der Foliensysteme wurden nicht durchgeführt.

11. Zusammenfassung des II. Teils

Im Rahmen der Vorbereitungen zur Versuchsdurchführung wurden die Bakterien Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans erfolgreich angezogen und in Massenkultur gebracht.

Die Bakterien konnten weder durch Zentrifugation noch durch Filtration in ausreichender Menge aus dem Vollmedium abgetrennt werden. Daher erschien es sinnvoll, die Nährlösung mit einer Pufferlösung zu verdünnen. Hierfür wurde ein Verhältnis von 1:4 als geeignet ermittelt.

Der Angriff und die Umsetzung von Gips wurden anhand der Zugabe von kleinen Gipswürfeln zu verschiedenen Bakteriensuspensionen bestätigt. Es zeigte sich, dass die Verdünnung des Vollmediums mit Puffer zu guten Ergebnissen führte.

Als mögliche Applikationstechniken wurden in verschiedenen Vorversuchen das Andicken der Medium- Puffer- Mischung mit Carbopol sowie das Tränken von Foliensystemen mit der Suspension ausgewählt.

[229] Weiß-Quasdorf 2005, S.44.

Teil 3

I. Durchführung der mikrobiellen Salzverminderung

1. Einleitung

Die Bakterienstämme Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans waren erfolgreich kultiviert und in Massenkultur gebracht worden. Für die Applikation der Bakterienkompresse war ein Verhältnis Vollmedium zu Puffer 1:4 ermittelt worden. Durch die Zugabe von Gipswürfeln zu der Bakteriensuspension wurde die Bakterientätigkeit bestätigt.

Nun galt es festzustellen, ob die Bakterien auch Gips umsetzen, der in natürlich gewachsenen Krusten gebunden und damit von zahlreichen Fremdstoffen umgeben ist. Hierfür mussten zunächst geeignete Objekte ermittelt werden. Der Versuch sollte an natürlich verkrustetem Sandsteinmaterial unter Laborbedingungen und an unterschiedlichen Objekten in situ durchgeführt werden.

Das Probematerial sollte aus Sandstein bestehen und natürlich gewachsene Gipskrusten aufweisen. Weiterhin musste es möglich sein, das Steinmaterial umfangreich zu beproben, da davon auszugehen war, dass der Nachweis der mikrobiellen Tätigkeit nicht nur optisch, sondern auch durch die Betrachtung des Gefüges und durch verschiedene Gipsnachweise erfolgen musste. Das Steinmaterial für die Laborversuche musste außerdem in transportfähigen Größenordnungen vorliegen.

Eine Reise nach Dresden ergab, dass an vielen Großobjekten aus Sandstein schwarze Krusten vorliegen. Die Beprobung mit Teststreifen „Sulfatnachweis Quantofix“ ergab jedoch bei etwa 30 von 40 beprobten Steinen, dass die Krusten entweder kein Sulfat aufwiesen oder es nur in sehr geringen Mengen (<200 µl) enthalten. Es erwies sich als schwierig, Material zu bekommen, das sich ins Labor transportieren und beproben ließ. Schließlich konnte Steinmaterial, das Gipskrusten zeigte, aus den Sächsischen Sandsteinwerken Pirna nach Hildesheim transportiert werden.

Überdies wurden an Schloss Książ in Polen sowie im Nordparadies des Hildesheimer Domes Feldversuche durchgeführt. Die Fotodokumentationen sind im Anhang beigefügt.

2. Natürlich verkrustetes Sandsteinmaterial aus Dresden im Labor

2.1. Zielstellung und Vorüberlegungen

Bei dem Laborversuch sollte die bestmögliche Art der Applikation und Befestigung der Kompressen auf den Steinoberflächen gestestet werden. Außerdem galt es zu ermitteln, ob die Bakterien den Kontakt mit Sauerstoff bei der realen Anwendung am Objekt überleben können und ob eine längere Applikation auch zu einem besseren Ergebnis führt. Parallel musste überprüft werden, ob mit der Behandlung Nebenwirkungen oder negative

Begleiterscheinungen wie z.B. Verfärbungen oder Verdichtung der Oberfläche verbunden sind.

2.2. Herkunft des Steinmaterials

Das verwendete Sandsteinmaterial wurde von der Firma Sächsische Sandsteinwerke Pirna zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um zwei unterschiedliche Sandsteine in den Maßen von etwa 30 x 40 x 20 cm, die an einem Barock- Brunnen verbaut waren. Dieser wurde nach der Flutkatastrophe von 2002 ab- und anschließend nicht wieder aufgebaut. Die Sandsteine zeigen aufliegende Krusten und unterschiedlich starke Verschwärzungen.

Abb. 28 Probenmaterial Dresden, Stein I

Abb. 29 Probenmaterial Dresden, Stein II

Bei dem im Folgenden als „Stein I“ bezeichneten Sandstein handelt es sich um einen sächsischen Sandstein, der vermutlich aus dem Vorkommen Cotta stammt. Er zeichnet sich durch eine intensive schwarze Bänderung aus und ist sehr feinkörnig. Das Profil des Steines I zeigt im Bereich einer Hohlkehle eine aufliegende gräulich- schwarze, partiell fest anhaftende Kruste, die in den Vorversuchen als Gips identifiziert wurde.
Der Sandstein „Stein II“ ist sehr viel grobkörniger und vermutlich den Schlesischen Sandsteinen zuzuordnen. Er wirkt farblich homogener, sandet aber auch viel stärker. Der Stein kann nicht genau benannt werden. Stein II zeigt ebenfalls leichte Krustenbildung im Bereich eines Profils. Auf der Steinunterseite, die offensichtlich auch längerfristig bewittert war, haben sich ebenfalls starke Krusten von unterschiedlicher Erscheinung gebildet. Auch in diesen Bereichen konnte Gips nachgewiesen werden, ebenso wie auf den Seitenflächen.

2.3. Testflächen

Für die Applikation der Biokompressen wurden insgesamt 10 Probeflächen in der Größenordnung von etwa 5 x 3 cm angelegt. Sie wurden wie folgt gekennzeichnet:

Probefläche Nr.	Kompressensystem	Bakteriensuspension	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein II	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein I	3 Tage
3	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein II	3 Tage
4	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein I	3 Tage
5	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein II	3 Tage
6	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein I	3 Tage
7	PP- Folie 3- schichtig	aqua dest.	Sandstein II	3 Tage
8	Carbopol	Puffer- Medium unbeimpft	Sandstein II	3 Tage
9	PP- Folie 3- schichtig	Puffer- Medium unbeimpft	Sandstein II	3 Tage
10	Arbocel	Ammoniumcarbonat	Sandstein II	1 Tag

Tabelle 10, Bezeichnung der Probeflächen des Laborversuches

Bei den Versuchen wurden die drei ausgewählten Kompressensysteme mit beiden Desulfovibrio- Arten gestestet. Darüber hinaus wurde mit einer reinen aqua dest.- Kompresse und zwei unbeimpften Puffer- Medium- Mischungen im Verhältnis 4:1 in verschiedenen Kompressensystemen überprüft, ob auch diese einen Reinigungserfolg erzielen. Für einen weiteren Vergleich wurde zusätzlich eine Ammoniumcarbonat-Kompresse angelegt.

2.4. Probennahme Vorzustand

Die etwa 5 x 3 cm umfassenden Flächen des Steines wurden unmittelbar vor dem Anbringen der Kompressen mit einem Etikett versehen und fotografisch erfasst. Jeder der Probeflächen wurde eine Oberflächenkrustenprobe von etwa 0,5 x 0,5 cm entnommen. Dies geschah durch Vorlegen der Probenränder mit dem Mikroschleifgerät „Dremel“ und anschließendem Ausheben der Probe mit Hammer und Meißel. Das Probenmaterial wurde in Plastiktütchen verpackt und bis zur weiteren Verwertung unter Raumtemperatur gelagert. Die Probeflächen wurden anschließend mit den unterschiedlichen Kompressen versehen.

2.5. Applikation

Vor der Durchführung der mikrobiellen Salzreduzierung waren drei verschiedene Kompressensysteme für die Applikation ausgewählt worden. Alle verwendeten Materialien sowie die beimpften Bakterien- Puffersuspensionen waren vor der Durchführung der Maßnahme hergestellt und vorbereitet worden.

Für die Versuche wurden eine zweischichtige Kompresse aus Polypropylen- Folie mit Polypropylen- Vlies einseitig gedochtet bei einer Dochtung von 4 Dochten/ cm² verwendet sowie eine dreischichtige Kompresse Polypropylen- Folie mit einem Polyester- Vlies beidseitig gedochtet bei einer Dochtung von 4 Dochten/ cm².

Als dritte Applikationsart wurde die Bakteriensuspension mit Carbopol angedickt und als Paste auf die Oberflächen aufgebracht.

Die Folien wurden in einer Größe von etwa 5 x 3 cm zurechtgeschnitten und jeweils gründlich von beiden Seiten mit der selbst hergestellten und vorbereiteten Bakteriensuspension (ca. 15-20 ml, Puffer- Medium im Verhältnis 4:1, D. vulgaris- Kultur mit einer Zelldichte von ca. 44^6 Zellen/ml, D. desulfuricans- Kultur mit ca. 48^6 Zellen/ml) eingesprüht und anschließend auf der Oberfläche platziert. Auf die Folie wurde gemäß der Empfehlung des Projektes „Biokompresse“ eine gelochte Plastik- Fußmatte aufgebracht[230]. Kompresse und Matte wurden mit Gewebeband auf der Steinoberfläche fixiert. Die Matte sollte einen gleichmäßigen Druck erzeugen und damit den unmittelbaren Kontakt zwischen Kompresse und Stein gewährleisten. Zudem stellte die Matte eine zusätzliche leichte Absperrung dar, die dennoch das Nachnässen der Oberfläche durch Nachsprühen ermöglichte. Die Matte sollte auch eine Schonung der Folie sein, da eine Fixierung der Kompresse mit Klebeband diese für eine etwaige spätere Wiederverwertung ausgeschlossen hätte.

Trotz der rauen Oberflächen, die z.T. auch sandeten, konnte das Gewebeband die Kompressen sicher fixieren. Partiell löste sich das Gewebeband von der Steinoberfläche, hielt aber dennoch die Kompressen in Position.

Die Carbopol- Kompresse[231] wurde unmittelbar vor der Applikation angerührt. Dazu wurde die Bakteriensuspension in einen Gipsbecher gegeben und Carbopol nach und nach unter schnellem Rühren zugefügt[232]. Das im Rahmen des BIOBRUSH- Versuches empfohlene Mischverhältnis von 1,3 g auf 100 ml hatte sich als untauglich für die Applikation erwiesen, da hiermit keine gelartige Konsistenz erreicht werden konnte und die Suspension nicht auf den Oberflächen haftete[233]. Für die Probeflächen von 15 cm² wurden etwa 40 ml Bakteriensuspension und 2 g Carbopol benötigt[234].

Die Mischung wurde mit dem Pinsel ca. 3 Minuten durchgerührt, bis eine weitgehend homogene Masse entstanden war. Eine Lage Japanpapier wurde auf der Steinoberfläche durch Ansprühen mit Bakteriensuspension (ca. 2 ml) fixiert. Auf dieses Japanpapier wurde die Carbopol- Paste mit einem großen Pinsel in einer Schichtdicke von etwa 2 mm gleichmäßig aufgetragen. Die Paste wurde mit einer weiteren Lage Japanpapier abgedeckt und erneut besprüht. Die Absperrung der Kompresse gegenüber dem Luftsauerstoff erfolgte durch eine abschließende Lage Folie, die mit Klebeband an der Steinoberfläche fixiert wurde.

---

[230] Wenk 2005, S. 158.
[231] Materialbeschreibung s. Teil 2, Kap. IV.2, Carbopol, S. 62.
[232] entsprechend der Empfehlung von U. Haller 1994, S. 46.
[233] s. Anhang, Merkblatt BIOBRUSH.
[234] s. Teil 2, Kap. IV.4, verwendete Kompressenmaterialien, Mischverhältnisse, S. 65.

Das Nachnässen der Proben erfolgte während der gesamten Versuchsdauer jeweils morgens (zwischen 9-10 Uhr), mittags (zwischen 12.30-13.30 Uhr) und abends (zwischen 16-17 Uhr) mit 4-5 ml Bakteriensuspension, bis die Kompressen wieder feucht waren. Dazu wurden die PP- Folien seitlich und von oben gründlich mit Bakteriensuspension eingesprüht. Abschließend wurde auch die Matte von vorn eingesprüht. Unterhalb des Gewebebandes war ein Nachfeuchten nur eingeschränkt möglich. Bei den Carbopol- Kompressen wurde für das Nachfeuchten die abdeckende Folie kurzzeitig entfernt und die obere Japanpapierlage mit 4-5 ml Bakteriensuspension eingesprüht.
Die Wasserkompresse sowie die unbeimpften Puffer- Medium- Kompressen wurden ebenfalls mit den entsprechenden Flüssigkeiten eingesprüht. Die Ammoniumcarbonat-Kompresse verblieb einen Tag ohne Nachfeuchten auf der Oberfläche.

2.6. Beobachtungen

Alle Kompressen hielten während der ersten drei Tage auf den Oberflächen. Die Fixierung mit Gewebeband war für die verschiedenen Foliensysteme geeignet. Im Bereich der Probeflächen an Stein I, die sich in einer Hohlkehle befanden, gestaltete sich die Fixierung der Folien- Kompressen etwas schwierig, da die aufliegende Matte der Hohlkehle nicht ohne Weiteres anzupassen war.
Die Carbopol- Kompressen hafteten ebenfalls fest auf der Oberfläche, teilweise jedoch stärker an der aufliegenden Folienschicht, so dass das Japanpapier partiell beim Nachnässen einriss. Es kam, vor allem auf der Seitenfläche des Steins II, zu einem starken Einwandern des Carbopols in den Stein, eine pastose Schicht auf der Oberfläche war bereits nach einem Tag nicht mehr erkennbar. Dennoch wurde das Japanpapier bis zur Abnahme weiter mit Bakteriensuspension regelmäßig nachgefeuchtet.

2.7. Probennahme Endzustand

Nach drei Tagen wurden alle 9 Kompressen kurzzeitig von den Oberflächen abgenommen. Die kleinen Kompressenfolien aus PP- Folie hatten die Feuchte gut zurückgehalten und präsentierten sich auch in der Mitte noch feucht. Die Carbopol- Kompresse auf Stein I (Probefläche 6) war weitgehend in den Stein eingezogen, während die Kompresse auf Stein II (Probefläche 5) unverändert erschien. Die Carbopol- Kompresse mit der unbeimpften Medium- Puffer- Mischung zeigte einen deutlichen Volumenverlust, die Carbopol- Paste war in die Steinoberfläche eingezogen. Aus dem Vlies- Bereich der PP- Folien wurden kleinste Faserproben herausgeschnitten. Bei den mit Carbopol behandelten Flächen wurde mit einem Zahnarztspachtel etwas Kompressenmaterial von der Oberfläche aufgenommen und luftdicht in Greinerröhrchen verpackt. Die Kompressenproben wurden anschließend mit Baclight angefärbt und unter UV- Licht auf vitale und aktive Zellen untersucht.

Auf den Testflächen, die mit PP- Folien behandelt worden waren, waren keine Veränderungen erkennbar, die über eine leichte Farbvertiefung aufgrund des Feuchteeintrags hinausgingen. Die Oberflächen, die mit Carbopol- Kompresse zeigten ebenfalls eine leichte Farbvertiefung, wobei diese zu diesem Zeitpunkt auch auf den erhöhten Feuchteeintrag zurückgeführt werden kann.
In allen Probeflächen wurden nach Abnahme der Kompressen erneut Proben mit dem „Dremel“ aus dem Anschlussbereich der Vorzustandsproben entnommen und bis zur Auswertung im Photometer in kleine Tütchen verpackt. Anschließend wurden die Folien nachgenässt und wiederum auf dieselben Objektbereiche aufgetragen. Die Carbopol-Kompresse wurde neu hergestellt und appliziert.
Durch die erneute Applikation sollte überprüft werden, ob eine Applikation über drei Tage hinaus das Ergebnis der Salzreduzierung verbessert.
Nach sechs Tagen wurden die Kompressen endgültig von den Oberflächen entfernt. Es wurden wiederum Proben der Kompressen entnommen und nach Anfärbung mit Baclight unter UV- Licht bewertet. Die Bakterien präsentierten sich weiterhin unverändert aktiv und vital. Anschließend erfolgte in allen verbliebenen Testflächen erneut eine Probennahme nach bekanntem Muster mit dem Mikroschleifgerät „Dremel“ und Hammer und Meißel. Die Proben wurden wiederum in Tütchen verpackt und bis zur Auswertung im Photometer unter Raumklima gelagert.

2.8. Ergebnis

Die Untersuchung der Kompressenmaterialien auf vitale Zellen ergab unmittelbar nach Abnahme von den Steinoberflächen ein gutes Ergebnis für die verschiedenen Kompressensysteme. Die Bakterien sind in der Lage, innerhalb der Folien sechs Tage zu überleben.
Die behandelten Steinoberflächen zeigten unmittelbar nach Abnahme nur eine leichte optische Farbvertiefung aufgrund des erhöhten Feuchteeintrags. Nach weiteren drei Tagen konnte in einigen Probeflächen eine leichte Aufhellung der behandelten Bereiche beobachtet werden.
Die Foliensysteme erscheinen in der Applikation einfach und benutzerfreundlich. Sie sind einfach aufzubringen und wieder zu entfernen. Die Befestigung mit Gewebeband ist auf den Probesteinen durchführbar, allerdings auf empfindlicheren Oberflächen wie Wandmalereien ungeeignet. Die Befestigung kann noch weiter verbessert werden.
Die Carbopol- Kompresse ist in der Herstellung zeitintensiv und damit mit einem hohen Sauerstoffeintrag verbunden, der jedoch keinen negativen Einfluss auf die Aktivität der Bakterien zeigt. Auf stark saugenden Gesteinen kommt es zu einem hohen Materialeintrag in das Gefüge. Entgegen der Vorversuche im Labor und Angaben aus vergleichbaren Studien

kann auch die Trennschicht aus Japanpapier das Einwandern des Carbopols in die Oberfläche nicht unterbinden[235]. Offensichtlich ist die Adsorption des Kompressenmaterials unmittelbar an das Trägermaterial und seine Porosität gekoppelt. Die Matten scheinen für die Applikation auf ebenen Oberflächen besser geeignet, während die Carbopol- Paste auch profilierten und Bildhaueroberflächen anzupassen ist. Die Langzeiteinflüsse wie Tiefenlichtveränderung und Farbintensivierung müssen weiterhin beobachtet werden.

3. Natürlich verwittertes Sandsteinmaterial in Schloss Książ, Polen

3.1. Zielstellung

Zur Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit sollten die Biokompressen auch im Außenbereich auf Steinoberflächen mit natürlich gewachsenen Gipskrusten eingesetzt werden. Dabei ging es vor allem darum festzustellen, ob es möglich ist, die Bakterien über weitere Strecken und einen längeren Zeitraum zu transportieren, ohne dass die Veränderung von Temperatur und Lagerung außerhalb der Anaerobenkammer negative Einflüsse auf die Aktivität und Vermehrung der Bakterien zeigten. Auch die Dauer der Applikation über einen Zeitraum von 3 bzw. 6 Tagen am Objekt sollte überprüft werden.
Es galt, die Testflächen vor und nach der Kompressenbehandlung zu beproben, um anhand des Probenmaterials weiter zu ermitteln, ob durch die Bakterien eine Reduktion der Gipskruste erzielt werden kann. Der Applikation der Biokompressen am Objekt erfolgte am Schloss Książ in Niederschlesien / Polen.

Abb. 30 Ansicht des Schlosses Fürstenstein von der Westseite aus, September 2005

[235] Haller 1994, S. 55.

3.2. Geschichte des Objektes

Das Schloss Fürstenstein / Książ ist eine weitläufige Schlossanlage, die sich in unmittelbarer Nähe der Kreisstadt Waldenburg (Wałbrycz) in Niederschlesien befindet. Es ist das drittgrößte Schloss Polens. Die Ursprünge des Schlosses mit dazugehörigen Wirtschafts- und Parkanlagen reichen bis ins 13. Jahrhundert zurück. In den folgenden Jahrhunderten wurde die Anlage mehrfach umgebaut und umfassend erweitert. Das Schloss hat 400 Säle, von denen der prächtigste der barocke, reich verzierte „Maximiliansaal“ aus der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts ist. Bis in die 30er Jahre des 20. Jahrhunderts war das Schloss Eigentum der Familie Hochberg- von Pless[236].

Die Schlossanlage ist direkt auf den Felsen gebaut. Das Mauerwerk besteht hauptsächlich aus Felsstein und ist mit architektonischen Elementen wie Fenstergesimsen, Balkonen und Brüstungsabdeckungen aus Sandstein versehen. Die Südfassade in ihrer heutigen Gestalt stammt aus dem 18. Jahrhundert und ist verputzt. Die gesamte Nordfassade wurde Anfang des 20. Jahrhunderts gebaut und besteht aus einem roten Sandstein der Gegend.

3.3. Testflächen

Für die Testflächen wurden zwei größere Objektbereiche an der Süd- und Westfassade des Hauptschlosses ermittelt, die plastisch nicht ausgearbeitet waren und außer einer Scharrierung keine Oberflächenbearbeitung zeigten. Aufgrund der umfangreichen Beprobung sollten die zu beprobenden Bereiche nicht ohne weiteres einsehbar sein und die entstehenden Fehlstellen sich möglichst ohne ästhetische Beeinträchtigung in das Gesamterscheinungsbild einfügen. Darüber hinaus sollte gewährleistet sein, dass es sich bei den Bereichen um keine stark bewitterten Partien handelte, damit keine Folgeschäden durch Entfernung der Kruste und veränderte Wasseraufnahme entstehen können.

Die Probeflächen 1-21 wurden in exponierter Lage an der Brüstung der südlichen Aussichtsterrasse angelegt. Die Abdeckung der Brüstung besteht aus einem stark verkrusteten dichten Sandstein, der nicht näher benannt werden kann, vermutlich aber aus der Gegend stammt.

Schlesische Sandsteine sind durch ihre große Härte relativ verwitterungsresistent[237]. Dennoch konnten auch auf ihnen Gipskrusten nachgewiesen werden[238]. Auf den schlesischen Sandsteinen entwickelt sich die oft pustelartig auftretende Gipskruste ausschließlich infolge des Eintrags von Ca- Ionen aus Fugmörteln, Antragungen oder kalkhaltigen Anstrichen. Diese Kruste kann schon in wenigen Jahren zu entsprechenden Materialverlusten führen[239].

[236] www.urlaub-polen.de
[237] Ehling 1999, S. 90.
[238] Ehling, 1999, S. 91.
[239] Ehling, 1999, S. 101.

Die Innenwange der Brüstung, die durch intensive Verschwärzung gekennzeichnet war, bot sich mit einer Höhe von etwa 20 cm für den Einsatz der Biokompressen an. Die vorgefundenen Krusten auf dem Stein präsentierten sich in unterschiedlicher Stärke und Farbigkeit. Bei der Probennahme wurde Wert darauf gelegt, verschiedene Krustenstadien zu erfassen. Die Probeentnahmestellen waren hier ohne weiteres einsehbar. Da es sich aber nicht um ein gliederndes Element, sondern ausschließlich eines funktioneller Natur (Verdeckung der Mauerkrone des darunter befindlichen Bruchsteinmauerwerks) handelte, blieb die ästhetische Beeinträchtigung unberücksichtigt. Weitere größere Sandsteinflächen, an denen eine Durchführung des Versuches möglich gewesen wäre, konnten nicht ermittelt werden.

Die Probefelder 22 - 24 wurden in den beiden Wangen eines Balkons an der Westfassade des Schlosses angelegt. Die Balkone sind dem Schlossbesucher nicht zugänglich und von der Gartenseite aus aufgrund der Höhe der Fassade nicht einsehbar. Das Bauteil besteht aus rotem Sandstein der Gegend, der durch starke schwarze Verkrustungen in den vor direkter Witterung geschützten Bereichen, in denen das Wasser länger zurückgehalten wird, gekennzeichnet ist.

Abb. 31, Probeflächen 1 – 14

Abb. 32, Probeflächen 15 – 18

Abb. 33, Probeflächen 19 – 21

Abb. 34 Probeflächen 22 und 23 an der Nordfassade

Insgesamt wurden 24 Probeflächen in der Größenordnung von etwa 20 x 20 cm angelegt. Sie wurden wie folgt gekennzeichnet:

Probefläche Nr.	Foliensystem	Bakteriensuspension Desulfovibrio	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
3	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
4	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
5	PP- Folie 2- schichtig	Mix	Sandstein gelb	3 Tage
6	PP- Folie 2- schichtig	Mix	Sandstein gelb	6 Tage
7	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
8	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
9	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
10	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
11	PP- Folie 3- schichtig	Mix	Sandstein gelb	3 Tage
12	PP- Folie 3- schichtig	Mix	Sandstein gelb	6 Tage
13	Carbopol- Paste	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
14	Carbopol- Paste	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
15	Carbopol- Paste	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
16	Carbopol- Paste	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
17	Carbopol- Paste	Mix	Sandstein gelb	3 Tage
18	Carbopol- Paste	Mix	Sandstein gelb	6 Tage
19	PP- Folie 2- schichtig	Puffer- Medium unbeimpft	Sandstein gelb	6 Tage
20	PP- Folie 3- schichtig	Puffer- Medium unbeimpft	Sandstein gelb	6 Tage
21	Carbopol- Paste	Puffer- Medium unbeimpft	Sandstein gelb	6 Tage
22	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein rot	3 Tage
23	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein rot	3 Tage
24	Carbopol- Paste	Mix	Sandstein rot	3 Tage

Tabelle 11, Zusammenstellung der Kompressen

Die Probeflächen 1-14 waren Richtung Norden ausgerichtet und durch das Schloss vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt. Nur nachmittags ab ca. 16 Uhr schien die Sonne seitlich auf die Kompressen. Die Kompressen 15-18 wurden an der Brüstung in südlicher Richtung angebracht und von 10-15 Uhr direkt beschienen. Die drei Neutralkompressen 19-21 waren der Sonne von 7-13 Uhr ausgesetzt, sie wurden in östlicher Richtung angebracht.
Die Kompressen 22-24 befanden sich in der Laibung an einem Balkon der Westfassade. Die beiden Kompressen aus PP- Folie waren dabei in südlicher Richtung, die Carbopol-Kompresse in nördlicher Richtung ausgerichtet. Die beiden Südkompressen, waren von etwa 13-17 Uhr, die Carbopol- Kompresse von 15-19 Uhr seitlich der Sonne ausgesetzt.

3.4. Probennahme Vorzustand

Die 24 etwa 20 x 20 cm umfassenden Flächen wurden vor der Behandlung mit einem Etikett versehen und fotografisch erfasst. Jeder der Probeflächen wurden anschließend drei Oberflächenkrustenproben entnommen. Die Probennahme erfolgte nach bekanntem Muster mit „Dremel“, Hammer und Meißel. Die Proben wurden in Plastiktütchen verpackt und bis zur weiteren Verwertung unter Raumtemperatur gelagert[240]. Die Probeflächen wurden erneut fotografisch erfasst und anschließend mit den unterschiedlichen Kompressen versehen.

3.5. Applikation

Wie auch bei den Versuchen im Labor wurden drei verschiedene Kompressensysteme auf den Probeflächen appliziert. Zum Einsatz kamen wiederum zwei verschiedene Polypropylen-Folien sowie die Carbopol- Paste. Die Folien wurden in einer Größe von etwa 22 x 22 cm zurechtgeschnitten, jeweils gründlich von beiden Seiten mit 50-60 ml der selbst hergestellten und vorbereiteten Bakteriensuspension (Zelldichte ca. 32^6 Zellen/ml) eingesprüht und anschließend auf der Oberfläche platziert. Zur Stabilisierung wurde auf die Folie eine in der Größe passende, gelochte Plastik- Fußmatte gelegt[241]. In Ermangelung einer Alternative wurden die Folienkompressen wiederum mit Gewebeband an den Oberflächen befestigt.

Die Carbopol- Kompresse[242] wurde unmittelbar vor der Applikation angerührt. Dazu wurde die für eine Testfläche benötigte Menge Bakteriensuspension von 250 ml in einen Gipsbecher gegeben und etwa 13 g Carbopol nach und nach unter schnellem Rühren zugefügt[243]. Die Mischung wurde mit dem Schneebesen ca. 3 min durchgerührt, bis eine weitgehend homogene, feste Masse entstanden war. Eine Lage Japanpapier wurde auf der Steinoberfläche durch Ansprühen mit etwa 2 ml Bakteriensuspension fixiert. Auf dieses Japanpapier wurde die Carbopol- Paste mit einem großen Pinsel in einer Schichtdicke von etwa 2 mm gleichmäßig aufgetragen. Die Paste wurde mit einer weiteren Lage Japanpapier abgedeckt und erneut besprüht. Die Absperrung der Kompresse gegenüber dem Luftsauerstoff erfolgte durch eine abschließende Lage PE- Folie.

Die eine Hälfte der Kompressen (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 und 17, sowie 22 – 24) verblieb bei gleichmäßiger Nachfeuchtung drei Tage auf der Steinoberfläche, während die übrigen Kompressen 6 Tage auf dem Stein belassen wurden.

Das Nachnässen der Proben 1 bis 21 erfolgte in den ersten drei Tagen jeweils morgens (zwischen 9 - 10 Uhr), mittags (zwischen 12 – 13 Uhr), nachmittags (zwischen 14 – 15 Uhr) und abends (zwischen 16,30 bis 18 Uhr) mit etwa 15-20 ml Bakteriensuspension, bis die Kompressen wieder feucht waren. Dazu wurden die PP- Folien seitlich und von oben

[240] Knöfel 1993, S.22.
[241] Wenk 2005, S. 158.
[242] Materialbeschreibung s. Teil 2, Kap. IV.2. Alternativen zum Carbopol, S.63ff.
[243] entsprechend der Empfehlung von U. Haller, S. 46.

gründlich mit Bakteriensuspension eingesprüht. Abschließend wurde auch die Matte von der Vorderseite eingesprüht. Unterhalb des Gewebebandes war ein Nachfeuchten nur eingeschränkt möglich. Bei den Carbopol- Kompressen wurde für das Nachfeuchten die abdeckenden Folie kurzzeitig entfernt und die aufliegende Japanpapierlage mit Bakteriensuspension eingesprüht.
Die Proben auf rotem Sandstein wurden nur morgens (zwischen 9 – 10 Uhr) und abends (zwischen 16 – 18 Uhr) neu befeuchtet.
Ab dem vierten Tag wurden alle Kompressen morgens und abends nachgenässt.
Während der Versuchsdauer herrschte relativ konstantes Klima mit sonnigen Tagen bei einer Temperatur von 20°C, wobei auf den Steinoberflächen mit schwarzen Krusten sicherlich höhere Temperaturen erreicht wurden. Nachts kühlte es deutlich ab, es herrschten Temperaturen um 5°C. Die Luftfeuchtigkeit war relativ gering, so dass die Kompressen bei direkter Sonneneinstrahlung trotz Abdeckung sehr schnell austrockneten. Darüber hinaus gab es in den ersten drei Tagen starke Windböen, die ebenfalls zu der schnellen Auftrocknung der Kompressen beitrugen. In der Nacht vom 5. auf den 6. Tag gab es ein starkes Gewitter mit intensiven Wolkenbrüchen.

3.6. Beobachtungen

Alle Kompressen hielten während der gesamten Versuchsdauer auf den Oberflächen. Die Fixierung mittels Gewebeband für die verschiedenen Foliensysteme erwies sich als geeignet. Die Folienkompressen zeigten während des Versuchs keine optische Veränderung. Die Carbopol- Kompressen hafteten fest auf der Oberfläche, das Japanpapier riss teilweise beim Nachfeuchten ein, weil die Kohäsion zwischen Japanpapier und Folie stärker war als zwischen Kompresse und Stein. Ab dem zweiten Tag waren die Carbopol-Kompressen 15 bis 18 aufgrund der starken Sonneneinstrahlung und damit verbundenen Verdunstung des Wassers in der Kompresse bereits stark aufgetrocknet. Das Japanpapier hielt nur noch durch die Fixierung mit Klebeband auf der Oberfläche. Das Carbopol war nicht mehr zu erkennen und vermutlich aufgrund des feuchteren Milieus in den Stein abgewandert. Dennoch wurde das Japanpapier bis zur Abnahme regelmäßig weiter mit Bakteriensuspension nachgefeuchtet.

3.7. Probennahme Endzustand

Nach drei Tagen wurde die Hälfte der Kompressen (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 und 22 - 24) von den Oberflächen abgenommen. Dabei wurden, entsprechend zu dem Laborversuch, aus dem Vlies- Bereich der PP- Folien kleinste Faserproben herausgeschnitten und in Greinerröhrchen bis zur Beprobung gelagert. Bei den mit Carbopol behandelten Flächen

wurde mittels Zahnarztspachtels etwas Kompressenpaste aus dem Zwischenraum zwischen den Japanpapierlagen aufgenommen und luftdicht in Greinerröhrchen verpackt. Die Kompressenmaterialien wurden anschließend in UV- Licht auf Keimgehalt und Vitalität der Keime bewertet. Die Kompressen selbst, die Gewebebandreste und aufliegenden Matten wurden als Autoklaviermüll entsorgt.
Auf den Testflächen, die mit PP- Folien behandelt worden waren, waren keine Veränderungen erkennbar, so dass auf eine Nachreinigung verzichtet wurde.
Die Oberflächen, die mit Carbopol- Kompresse behandelt worden waren, zeigten nach der Abnahme eine Farbvertiefung. Sie wurden mit reichlich aqua dest. und Pinsel nachgereinigt.
In allen Probeflächen wurden nach Abnahme der Kompressen Proben mittels „Dremel“ und Hammer und Meißel genommen und in kleine Tütchen zur weiteren Auswertung verpackt.
Nach insgesamt sechs Tagen wurden auch von den übrigen Testflächen die Kompressen entfernt. In allen verbliebenen Testflächen wurden erneut drei Proben entnommen. Die Probenentnahme erfolgte nach bekanntem Muster. Die Endzustände wurde fotografisch erfasst. Das Probematerial wurde wiederum in Tütchen verpackt und bis zur weiteren Verarbeitung unter Raumklima gelagert.
Die Ermittlung der optischen Veränderung der Testflächen nach weiteren Tagen sowie abschließende Untersuchungen der Oberflächen konnten aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

3.8. Ergebnis

Durch den Versuch am Schloss Książ in Polen konnte aufgezeigt werden, wie die Applikation unter erschwerten Bedingungen am Objekt verlaufen kann. Der Vergleich der drei getesteten Applikationsmethoden bestätigte die Ergebnisse der Laborversuche: alle drei sind einfach und schnell umzusetzen, wobei die PP- Folien weniger zeitintensiv und durch die vorgegebene Dicke besser reproduzierbar sind als die für jede Kompresse neu gemischte Bakteriensuspension- Carbopol- Kombination. Dagegen lässt sich die Carbopol- Kompresse leichter nachnässen und zeigte in den sonnengeschützten Bereichen ein besseres Feuchterückhaltevermögen.
Auch an Schloss Książ in Polen zeigte die Carbopol- Kompresse in zahlreichen Testflächen schnelle Auftrocknung, die auch an Steinmaterial im Labor beobachtet werden konnte. Die Trennschicht aus Japanpapier hatte auch hier das Einwandern in das poröse Steinsystem entgegen den Ergebnissen aus vergleichbaren Studien[244] nicht unterbunden. Durch den Laborversuch hatte sich gezeigt, dass das Einwandern des Carbopols in den Untergrund mit der Porosität des Steinmaterials in Zusammenhang steht. Bei der Versuchsdurchführung in

[244] Haller, S. 55.

Polen schien darüber hinaus auch die Sonneneinstrahlung erheblich zu der Volumenverringerung des Carbopols beizutragen. Eventuell kann der schnellen Auftrocknung durch eine weitere Abdeckungsfolien oder Sonnenschutz entgegengewirkt werden.
Die Bakterien können längere Zeiträume in der Puffer- Medium- Mischung in luftdicht verschlossenen Flaschen überstehen. Die Veränderung von Temperatur und Lagerung außerhalb der Anaerobenkammer während des Transports und bis zur Applikation scheint keine negativen Einflüsse auf die Aktivität und Vermehrung der Bakterien zu haben. Auch das mehrfache Öffnen der Flaschen sowie Umfüllen in die Sprühflaschen zum Nachfeuchten der Kompressen schränkte die Aktivität der Bakterien nicht ein.
Die Bewertung der an den Fassaden durchgeführten Probeentsalzung konnte erst im Labor erfolgen. Die notwendige Ausstattung stand vor Ort nicht zu Verfügung. Da es während der Kompressenentsalzung in keiner der Testflächen zu einer optisch erkennbaren Veränderung der Oberflächen gekommen war, muss die Auswertung der Oberflächenproben den Beweis für die Wirksamkeit der bakteriellen Salzreduktion liefern. Dies wird durch eine quantitative Bestimmung der enthaltenen Gipsmengen in den Vorzustandsproben erfolgen, die mit den Endzustandsproben verglichen werden können.

4. Versuch der Salzreduzierung im Nordparadies, Hildesheimer Dom

4.1. Vorüberlegungen und Vorversuche

Als zweites Objekt für die Durchführung der mikrobiellen Salzverminderung im Außenbereich bot sich das Nordparadies des Hildesheimer Domes an. Ein Gespräch mit der Studentin J. Kalff ergab, dass diese während ihrer Arbeit im Nordparadies im Rahmen einer Facharbeit zum Diplom das dort verbaute Steinmaterial und die aufliegenden Krusten hatte untersuchen lassen. Ermittelt wurden Sulfatkrusten, bei denen es sich wahrscheinlich um Gipskrusten handelt[245].
Die Krusten wurden vor den Reinigungsversuchen zur Überprüfung verschiedenen Schnelltests unterzogen. Der halb- quantitative Test mit Quantofix- Streifen ergab eine starke Sulfatbelastung (>1600µl) des Mauerwerks. Ein anschließend durchgeführter Calcium-Nachweis bestätigte die Vermutung der Fachleute. Eine genaue Quantifizierung soll nach Versuchsdurchführung an dem umfangreichen Probenmaterial ermittelt werden.

[245] Kalff 2005, Anhang.

Das Lösen der Probe in aqua dest. und anschließende Versetzen mit einem Tropfen HCl ergab eine intensive Gipsnadelbildung. Die Krusten schienen also geeignet für den durchzuführenden Versuch der Salzreduzierung.

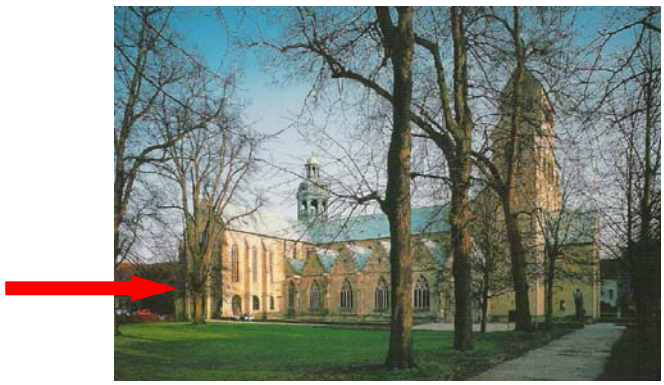


Abb. 35 Hildesheimer Dom mit Nordparadies links im Bild, Herbst 2005

4.2. Geschichte Objekt

Der Hildesheimer Dom St. Marien wurde im Jahre 1060 geweiht und ist zusammen mit der St. Michaelis- Kirche in Hildesheim seit 1986 Unesco- Weltkulturerbe. Er wurde im 2. Weltkrieg stark zerstört und Anfang der 60er Jahre unter Verwendung des ursprünglichen Steinmaterials wieder aufgebaut.

Das so genannte „Nordparadies“ befindet sich am nördlichen Langhaus in Höhe der Vierung und wird heute als Eingang genutzt. Es handelt sich um einen 1407-1412 im Auftrag von Lippold von Steinberg (1325-1415) entstandenen überdachten gotischen Anbau[246]. Verbaut wurden Siltsandstein, Flasersandstein und der regionstypische Mittel-Rhäthauptsandstein[247], der an vielen Gebäuden Hildesheims auftritt. Der fein- bis mittelkörnige Sandstein zeigt verschiedene Farbvariationen von hellbeige bis braun. Er ist gekennzeichnet durch hohe Festigkeit und gute Kornbindung, die auf das silikatische Bindemittel zurückgehen[248].

[246] Die umfangreiche Objektgeschichte ist der FAD von J. Kalff zu entnehmen.
[247] Die Einteilung geht auf Gervais, Lepper 2000 zurück.
[248] Kalff 2005, S. 57.

Der heutige Zustand der Bauform ist ursprünglich. Lediglich die Säulenschäfte und Basen, vereinzelte Rippenstücke des Gewölbes und die Gewölbeansätze der letzten beiden Joche an Ost- und Westwand sind nach dem 2. Weltkrieg ausgetauscht bzw. neu verfüllt worden. Heute sind zahlreiche Schäden wie Krustenbildung, Salzausblühungen, massive Oberflächenverluste, Feuchteschäden durch aufsteigende Feuchte, vermutlich auch starke Nitratbelastung und Auswitterungserscheinungen erkennbar. Das Bauteil ist nach drei Seiten offen und damit massiv der Witterung ausgesetzt. Die Fensteröffnungen sind vergittert aber nicht verglast, ebenso das Portal. Die Schadensbilder treten im Innenraum deutlicher als am Außenbau in Erscheinung.

4.3. Testflächen

Für die Testflächen wurde ein Bereich an der Westwand des Nordparadieses im Innenraum unterhalb einer Fensteröffnung gewählt.
Der Bereich ist durch starke Krustenbildung gekennzeichnet, mit der ein massives Abschalen der Oberflächen einhergeht. Stellenweise sind weiße Salzrasen auf der Oberfläche erkennbar. Die Originaloberfläche ist bereits in großen Bereichen abgängig.

Abb. 36 Testflächen an der Westwand des Nordparadieses, Hildesheimer Dom, Oktober 2005
im Vordergrund sind die Heizstrahler zu sehen, die nachts vor den Testflächen aufgestellt wurden

Insgesamt wurden 9 Probeflächen in der Größenordnung von etwa 20 x 20 cm angelegt. Sie wurden wie folgt gekennzeichnet:

Probefläche Nr.	Foliensystem	Bakteriensuspension	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
3	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
4	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
5	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
6	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
7	Carbopol	unbeimpft	Sandstein	3 Tage
8	PP- Folie 3- schichtig	unbeimpft	Sandstein	3 Tage
9	Arbocel	Ammoniumcarbonat	Sandstein	3 Tage

Tabelle 12, Zusammenstellung der Kompressen im Nordparadies, Hildesheimer Dom

Keine der Probeflächen war einer direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Aufgrund der späten Jahreszeit und damit verbundenen Witterung wurde beschlossen, die Probeflächen nachts mit einer Wärmequelle zu bestrahlen, um den Bakterien möglichst optimale Bedingungen zu schaffen. Die Wärmelampen wurden etwa 1 m vor den Probeflächen aufgestellt und waren an den Testtagen von 16.30 Uhr bis 9.30 Uhr in Betrieb. Sie sorgten für eine Oberflächentemperatur von 20-30°C.

4.4. Probennahme Vorzustand

Die Probennahme erfolgte unmittelbar vor dem Anbringen der Kompressen. Die etwa 20 x 20 cm umfassenden Flächen wurden vor der Behandlung mit einem Etikett versehen und fotografisch erfasst. In jeder der Probeflächen wurden anschließend drei Oberflächenkrustenproben genommen. Da die aufliegende schwarze Kruste sich in weiten Bereichen von dem Untergrund abhebt und zum Teil bereits abgängig ist, konnten die Krustenproben einfach mit dem Skalpell abgenommen werden. Sie wurden in Plastiktütchen verpackt und bis zur weiteren Verarbeitung unter Raumtemperatur gelagert[249]. Die Probeflächen wurden erneut fotografisch erfasst und anschließend mit den unterschiedlichen Kompressen versehen.

4.5. Applikation

Für die Versuche wurden die im Labor und in Polen genutzten Kompressensysteme verwendet. Die Folien wurden in einer Größe von etwa 22 x 22 cm zurechtgeschnitten und jeweils gründlich mit 50-60 ml der selbst hergestellten und vorbereiteten Bakteriensuspension (Vulgaris- Kultur ca. 44^6 Zellen/ml, Desulfuricans- Kultur ca. 48^6 Zellen/ml) eingesprüht und anschließend auf der Oberfläche platziert. Auf die Folie wurde eine in der Größe passende, gelochte Plastik- Fußmatte gemäß der Empfehlung des

[249] Knöfel 1993, S.22.

Projektes „Biokompresse“ aufgebracht[250]. Kompresse und Matte wurden mit Gewebeband auf der Steinoberfläche fixiert. Wegen der rauen, sandenden Oberflächen konnte das Gewebeband die Kompressen nicht sicher fixieren. Zusätzlich wurden Metallböcke gegen die Kompressen gelehnt, die diese in Position hielten.

Die Carbopol- Kompressen[251] wurden unmittelbar vor der Applikation in den in Polen verwendeten Größenordnungen angerührt und mit einer Trennschicht aus Japanpapier auf die Oberflächen aufgebracht (40 ml Bakterienlösung, 2 g Carbopol). Die Paste wurde mit einer weiteren Lage Japanpapier abgedeckt. Abschließend wurde gegen die schnelle Austrocknung eine Lage PE- Folie aufgebracht, die mit Klebeband an der Steinoberfläche fixiert wurde. Das Nachnässen der Proben erfolgte während der gesamten Versuchsdauer jeweils morgens (zwischen 9 - 10 Uhr), und abends (zwischen 16 bis 17 Uhr) mit 15-20 ml Bakteriensuspension, bis die Kompressen wieder feucht erschienen.

Die Kompressen 1-8 wurden nach drei Tagen von den Oberflächen entfernt, während die Ammoniumcarbonat- Kompresse insgesamt 24 Stunden auf der Oberfläche verblieb. Sie wurde am Folgetag durch eine Neutralkompresse ersetzt, die ebenfalls nach 24 Stunden entfernt wurde.

Während der Versuchsdauer war die Witterung sehr wechselhaft. Nachts herrschten Temperaturen um den Gefrierpunkt, denen durch die Wärmestrahler entgegengewirkt wurde. Tagsüber lagen die Temperaturen zwischen 10 und 15°C. Die Luftfeuchtigkeit wurde nicht genau ermittelt, es regnete jedoch nur unmittelbar vor der Abnahme der Kompressen für etwa 1 Stunde.

4.6. Beobachtungen

Alle Kompressen hielten während der dreitägigen Versuchsdauer auf den Oberflächen. Die Fixierung mittels Gewebeband für die verschiedenen Foliensysteme erwies sich als geeignet, wobei das Abstützen der Kompressen durch die Metallböcke die Haltbarkeit unterstützte. Eine ausschließliche Fixierung durch die Böcke wurde aber nicht als ausreichend angesehen, da der Druck der Kompressen auf die Oberfläche nicht durchgehend kontrolliert werden kann.

Die Carbopol- Kompressen hafteten ebenfalls fest auf der Oberfläche. Es kam, wie auch in Polen, zu einem starken Einwandern des Carbopols in den Stein, eine pastose Schicht auf der Oberfläche war bereits nach einem Tag nicht mehr erkennbar. Dennoch wurde das Japanpapier regelmäßig bis zur Abnahme mit Bakteriensuspension nachgefeuchtet.

[250] Wenk 2005, S. 158.
[251] Materialbeschreibung s. Teil 2, Kap. IV.2, Carbopol, S. 62 ff.

4.7. Probennahme Endzustand

Nach drei Tagen wurden alle Kompressen (außer AMC) von den Oberflächen abgenommen. Es zeigte sich, dass die Kompressenfolien trotz der regelmäßigen Nachnässung im Zentrum der Kompresse trocken waren, während der Rand, an dem eine direkte Befeuchtung möglich war, sich nass präsentierte. Wiederum wurden kleinste Proben der unterschiedlichen Kompressenmaterialien entnommen und anschließend in UV- Licht bewertet.
Auf den Testflächen, die mit PP- Folien behandelt worden waren, waren keine Veränderungen zu sehen, so dass auf eine Nachreinigung verzichtet wurde. Die Oberflächen, die mit Carbopol- Kompresse behandelt worden waren, zeigten eine leichte Farbvertiefung und wurden mit reichlich aqua dest. und Pinsel nachgereinigt.
In allen Probeflächen wurden nach Abnahme der Kompressen erneut Proben mit dem Skalpell aus dem Kantenbereich der Kruste entnommen und in kleine Tütchen zur weiteren Auswertung verpackt.

4.8. Ergebnis

Transport und Umfüllen der Bakteriensuspension zeigten bei der Versuchsdurchführung keine einschränkende Wirkung auf die Aktivität der Bakterien. Wiederum konnte bewiesen werden, dass die Applikation einfach und ohne größeren Aufwand durchführbar ist. Die Foliensysteme erscheinen einfacher in der Applikation, und die Carbopol- Kompresse wurde hier in ihrem Feuchterückhaltevermögen aufgrund der starken Saugfähigkeit des Gesteins eingeschränkt. Das Japanpapier hatte die Funktion der Trennschicht nicht erfüllt.
Von einer Applikation über sechs Tage wurde aufgrund der niedrigen Außentemperaturen sowie aus Zeitgründen abgesehen.

5. Zusammenfassung

Die Applikation der Bakterienkompressen wurde erfolgreich an Steinmaterial im Labor sowie an zwei verschiedenen Objekten im Außenbereich durchgeführt. Die verschiedenen Kompressensysteme ließen sich einfach auf den unterschiedlichen Oberflächen befestigen und hielten über die gesamte Versuchsdauer an den Oberflächen. Sie erwiesen sich für die drei- und sechstägige Applikation geeignet.
Unmittelbar nach Abnahme der Kompressen konnte kein Reinigungserfolg verzeichnet werden. Allerdings stellte sich teilweise bei den Testflächen im Labor und am Hildesheimer Dom vier Tage nach Abnahme der Kompressen eine leichte Aufhellung der Oberflächen ein. Diese war auch bei den Kompressen ohne Bakterien erkennbar. Sie ist vermutlich auf das Abwaschen von aufliegendem Staub und Schmutz von den Oberflächen durch den mit der Kompresse verbundenen Feuchteeintrag zurückzuführen.

Ob es bei den in Polen behandelten Objektbereichen ebenfalls zu einer Aufhellung der Oberflächen gekommen ist, konnte aus Zeitgründen nicht ermittelt werden.
Für die Auswertung der mikrobiellen Salzverminderung wurde umfangreiches Probenmaterial für den quantitativen Sulfatnachweis entnommen. Dieser erfolgte nach Versuchsdurchführung im Labor für alle untersuchten Objekten gemeinsam.
An den verschiedenen Objekten wurden parallel zu der Durchführung sowie im Anschluss an die Abnahme der Kompressen zahlreiche Begleitversuche wie die Betrachtung der Kompressen und der Steinoberflächen unter UV- Licht sowie Mirowskimessungen und die Ermittlung des quantitativen Gipsgehaltes der Proben des Vor- und Endzustandes durchgeführt.

II. Begleitende Untersuchungen zur Durchführung des Versuchs am Objekt

1. Mikroskopische Untersuchungen

Die Applikation der Kompressen mit Bakteriensuspension war erfolgreich an drei verschiedenen Steinoberflächen durchgeführt worden. In allen Fällen erwies sich die Methode für den Restaurator durchführbar. Die Kompressen hatten im Labor und am Hildesheimer Dom eine leichte optische Aufhellung der behandelten Oberflächen herbeigeführt.
In Begleit- und Folgeversuchen galt es nun, die Wirksamkeit der Kompressen durch naturwissenschaftliche Untersuchungen zu bestätigen. Ziel einer Salzverminderung ist aus restauratorischer Sicht nicht nur die optische Verbesserung (meist Aufhellung) der behandelten Bereiche, sondern in erster Linie das Öffnen des Porenraumes durch die Entfernung oder Reduzierung der Kruste. Ob dies durch die Umwandlung des Sulfats in der Kruste in gasförmiges H_2S geschehen war, musste überprüft werden. Hierzu diente neben dem Vergleich der Wasserdampfdiffusion von unbehandelten und behandelten Steinoberflächen auch der quantitative Sulfatnachweis.
In einem ersten Schritt galt es festzustellen, ob die in verschiedene Kompressensysteme eingebundenen Bakterien nach der Applikation sowohl in den Kompressen als auch auf der Steinoberfläche nachweisbar sind und wie lange sie dort überleben. Dafür wurden direkt nach Abnahme die Vitalität und Aktivität der Bakterien in den unterschiedlichen Kompressen und auf den Steinoberflächen überprüft. Im Rasterelektronenmikroskop wurden die optischen Veränderungen der Kruste betrachtet und überprüft, inwieweit die Bakterien auf den Oberflächen verbleiben.

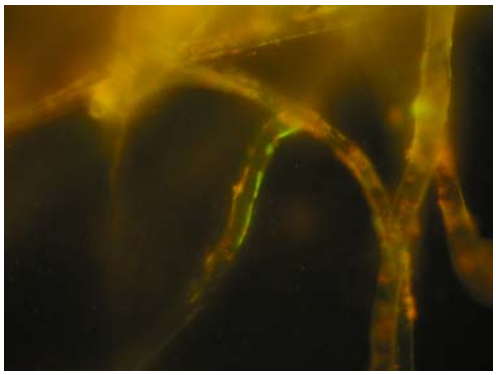
1.1. Betrachtung der Kompressenmaterialien unter UV- Licht

An allen drei Objekten wurden unmittelbar nach Abnahme der Kompressen aus den verwendeten Folien kleine Faserproben der Kompressen entnommen. Dafür wurde bei der zweischichtigen Folie ein kleiner Bereich aus der Mitte der Kompresse ausgeschnitten. Bei der dreischichtigen Folie wurden die Fasern aus einer Dochtung entnommen und in ein Greiner- Röhrchen überführt. Ebenso wurde eine kleine Menge applizierte Carbopol- Paste entnommen und in ein Greiner- Röhrchen überführt. Die verschiedenen Kompressenmaterialien wurden anschließend unter UV- Licht bewertet.

1.1.a. Foliensysteme

Die Kompressenfolien zeigten unter UV- Licht bei Anfärbung mit Baclight eine starke Eigenfluoreszenz. Daher mussten einzelne Fasern vorsichtig mit der Pinzette abgetrennt werden, um eine Betrachtung der Bakterien zu ermöglichen.

Bei den Proben der drei behandelten Objekte zeigte sich, dass sich die Bakterien, die auf die Kompressen aufgesprüht worden waren, auf den Oberflächen der Poly-Vinyl- Fasern angelagert hatten. Partiell war es zu einer Anhäufung in bestimmten Bereichen gekommen. Dieses Phänomen konnte bei beiden Desulfovibrio- Kulturen nachgewiesen werden.



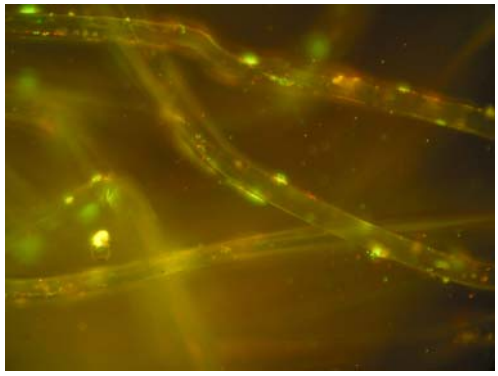


Abb. 37 und 38 mit D. vulgaris beimpfte PP- Folien 2- und 3- schichtig unter UV- Licht, eingesetzt im Labor

Bei den Proben des Laborversuchs war eine hohe Zelldichte mit etwa 50% grün fluoreszierenden Organismen zu erkennen. Ein Unterschied zwischen den zwei- und dreischichtigen Kompressen konnte nicht beobachtet werden.

In den Proben aus Polen waren nur sehr geringe Zelldichten ohne Bewegung und mit etwa 30% grüner Fluoreszenz als Zeichen lebender Zellen zu erkennen. Auch hier war kein Unterschied zwischen zwei- und dreischichtiger Kompresse erkennbar.

Die Betrachtung der Kompressenmaterialien aus dem Hildesheimer Dom unter UV- Licht brachte dieselben Ergebnisse wie in dem Laborversuch. (Generell war also eine hohe Zelldichte mit hauptsächlich grün fluoreszierenden Organismen zu erkennen.) Die zweischichtige Folie zeigte deutlich höhere Zelldichten als die Probe der dreischichtigen Kompresse, aber auch in dieser konnten zahlreiche, grün fluoreszierende Bakterien auf den Fasern nachgewiesen werden.
Die Kompressen, die sechs Tage auf den Oberflächen verblieben waren, zeigten bei dem Laborversuch und in Polen etwas höhere Zelldichten.

1.1.b. Carbopol- Kompresse

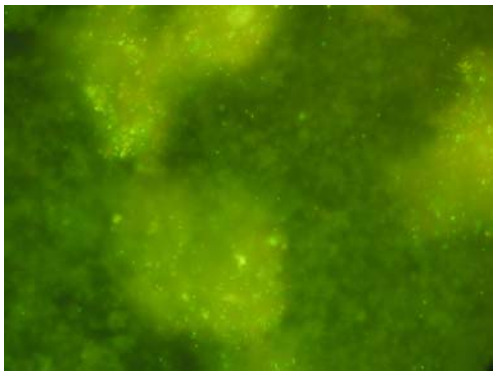


Abb. 39 Carbopol- Kompresse mit D. vulgaris, Labor

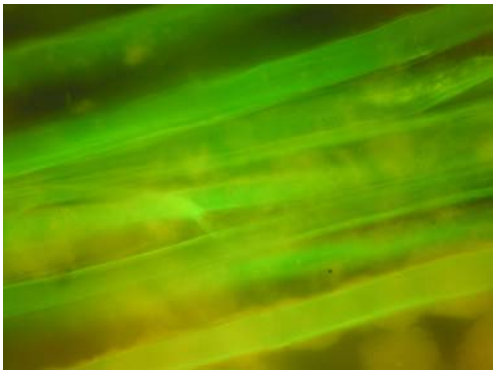


Abb. 40 Carbopol- Kompresse, Hildesheimer Dom

Die Betrachtung der Carbopol- Kompresse ergab leicht abweichende Ergebnisse.
Das Carbopol zeigte eine starke Eigenfluoreszenz, dennoch war eine hohe Anzahl an grün fluoreszierenden Mikroorganismen erkennbar (Abb. 39). Rot fluoreszierende Bakterien lagen nur in sehr geringen Mengen vor. Die Bakteriendichte war in beiden Desulfovibrio- Kulturen sehr hoch. Bewegung konnte nicht beobachtet werden.
Die Carbopol- Kompressen in Polen zeigten hohe Zelldichten und über 90% grüne Fluoreszenz. Bewegung konnte auch hier nicht beobachtet werden.
In der Carbopol- Kompresse des Hildesheimer Domes konnten keine Zellen nachgewiesen werden (Abb. 40). Wegen der starken Auftrocknung bzw. Einwanderung in den Stein war es nicht möglich, reines Carbopol- Material zu untersuchen, die Probe war mit Japanpapier versetzt. Das organische Material zeigt eine starke Eigenfluoreszenz, so dass Bakterien nicht erkannt werden konnten.

1.2. Betrachtung einer Krustenprobe unter UV- Licht

Unmittelbar nach der Probennahme wurde die Oberfläche jeweils einer Probe der unterschiedlichen Objekte mit einem Tropfen Baclight versehen und unter UV- Licht bewertet.

Auf allen Oberflächen waren sowohl rot als auch grün fluoreszierende Bakterien erkennbar, wobei der Anteil an grün fluoreszierenden Organismen deutlich höher war. Die Oberflächen zeigten eine starke Frequentierung durch beide Desulfovibrio- Arten, Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturen waren nicht erkennbar.

Durch die Betrachtung der Krustenproben wurde deutlich, dass die Bakterien sich innerhalb der Kompresse in Richtung Steinoberfläche bewegten. Auf den Proben waren höhere Zelldichten als innerhalb des Kompressenmaterials erkennbar.

Die starke Eigenfluoreszenz der Steinoberfläche und das ausgeprägte Profil bei 400facher Vergrößerung lässt die Aufnahme leicht verschwommen erscheinen. Nach dem Versuch wurden die Proben bis zur weiteren Verarbeitung in Plastiktütchen verpackt und unter Laborbedingungen gelagert.

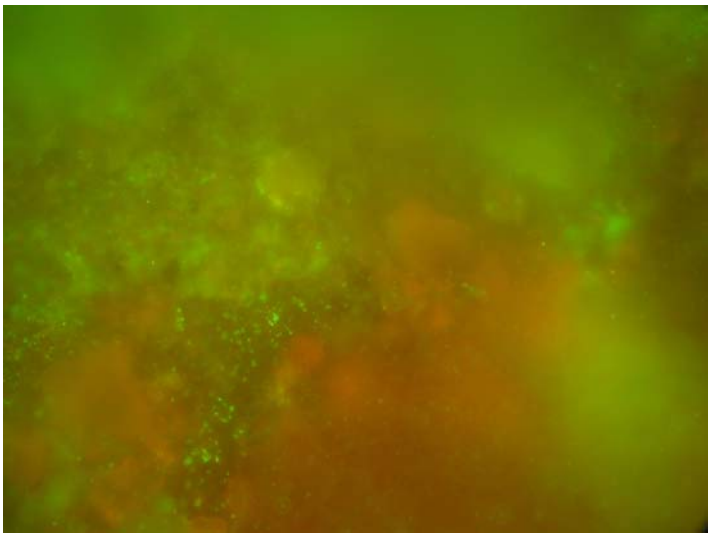


Abb. 41 Bakterien auf einer Probenoberfläche des Hildesheimer Domes, behandelt mit D. vulgaris in zweischichtiger PP- Folie

1.3. Krustenproben im Rasterelektronenmikroskop

Um die Veränderungen an den Steinoberflächen zu verdeutlichen, wurden Krustenproben der Vor- und Endzustände der Maßnahmen im Labor und am Hildesheimer Dom für die Rasterelektronenmikroskopie vorbereitet. Das Probematerial wurde etwa drei Wochen nach Abschluss der Applikation in der Carl von Ossietzky- Universität Oldenburg ausgewertet.

Die Aufnahmen der Probeflächen zeigen in erster Linie die unterschiedlichen Erscheinungsbilder des Gipses. Dabei wird deutlich, dass auch in den Endzuständen nach wie vor Gips im Gefüge vorhanden ist. Das Material erscheint fächerig bis nadelig. Die Aufnahmen der einzelnen Probeflächen sind der Fotodokumentation der Maßnahme im Anhang beigefügt.

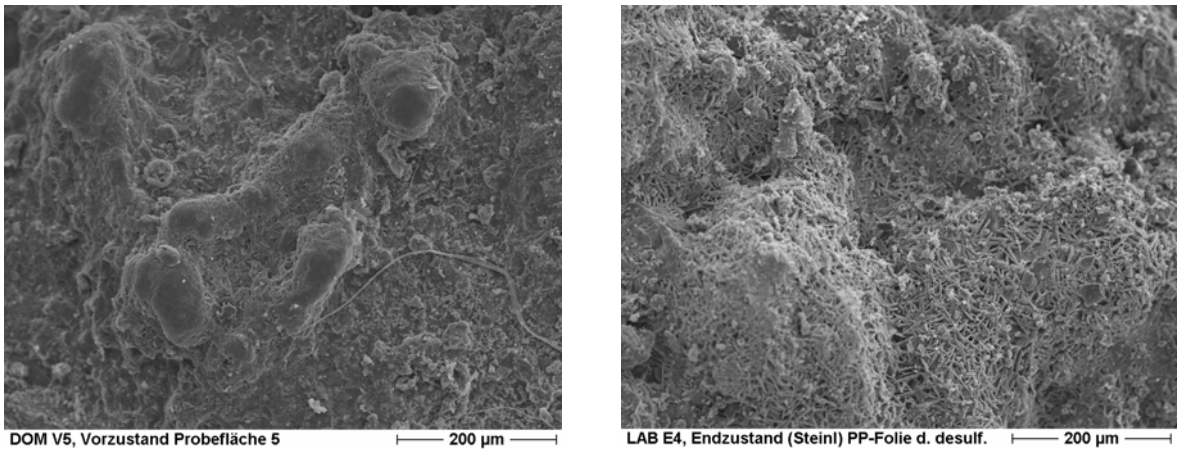


Abb. 42 und 43 unterschiedliche Erscheinungsbilder des Gipses in den Aufnahmen des REM

In keiner der Aufnahmen waren Bakterienzellen nachzuweisen. Dies erschien in Anbetracht der erheblichen Anzahl von aufgebrachten Organismen überraschend, wurde aber als positiv bewertet. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass die Bakterien tatsächlich am Luftsauerstoff nicht in der Lage sind, längere Zeitabschnitte zu überleben und möglicherweise von der Oberfläche abfallen.
Weiterhin war auch eine Besiedlung durch andere Mikroorganismen bzw. organisches Material nur sehr vereinzelt aufgezeigt. Dabei handelte es sich vornehmlich um Spinnweben, sehr vereinzelt Pilzsporen und Eier. Aus der geringen Besiedlung, die nach der Behandlung auf keinen Fall stärker als vorher ausfällt, kann geschlossen werden, dass weder die Sulfatreduzierer noch ihre Stoffwechselprodukte den Nährboden für andere Mikroorganismen bieten und die Applikation damit aus mikrobiologischer Sicht ohne negative Folgeerscheinungen bleibt.

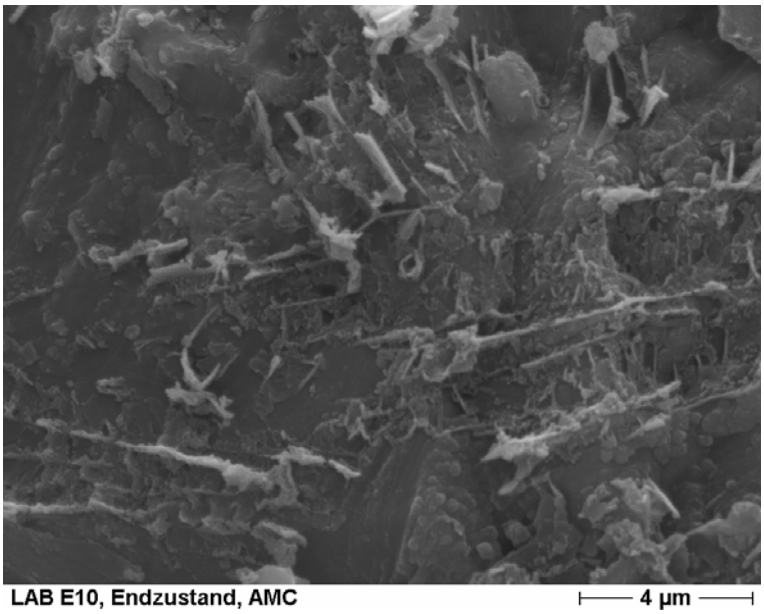


Abb. 44 mit AMC behandelte Oberfläche im REM

Die Behandlung mit Ammoniumcarbonat muss als negative Veränderung der Oberflächen bewertet werden. Die Oberflächen unterscheiden sich deutlich von allen anderen und zeichnen sich durch aufgebrochene Oberflächen, aufliegende Reste des Arbocels und Verdichtung durch „Um- Kristallisation“ aus.

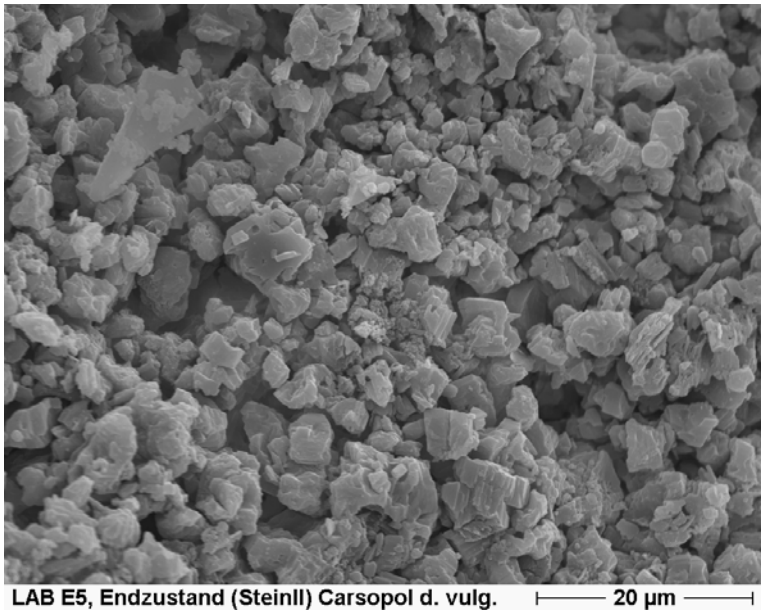


Abb. 45 mit Carbopol behandelte Oberfläche im REM

Dagegen war die Behandlung mit Carbopol in den REM- Aufnahmen nicht nachweisbar. Die mit Carbopol behandelten Oberflächen zeigen keine Verdichtung und sind durch die verschiedenen Erscheinungsbilder des Gipses gekennzeichnet.

1.4. Ergebnis

Die Betrachtung des Kompressenmaterials und der Stein- bzw. Probenoberflächen nach der Applikation ergab an allen Objekten eine starke Belegung der Steinoberflächen durch die Bakterien. Im Bereich der Kontaktschicht zwischen Folie und Steinoberfläche konnten auf dem Stein und im Kompressenmaterial zahlreiche, auch nach sechs Tagen noch lebendige Zellen nachgewiesen werden, wobei die Steinoberfläche deutlich höhere Zelldichten aufwies. Die Unterschiede in Zelldichte und Aktivität der Bakterien an den unterschiedlichen Objekten gehen vermutlich auf die Witterungsverhältnisse an den Objekten zurück. Möglicherweise hängt die Bakterientätigkeit auch mit der Zusammensetzung und dem Sulfatgehalt der Krusten zusammen. Ursache für die relativ geringe Zelldichte der in Polen verwendeten Kompressen kann die Abwesenheit von Gips und der nur geringe Sulfatgehalt der Proben sein. Außerdem waren in Polen auch die Ausgangszelldichten in der Bakteriensuspension etwas geringer als im Labor und am Hildesheimer Dom.

Die Betrachtung der Krustenproben nach Abnahme der Kompressen ergab, dass die Bakterien nicht unbedingt in Folien- oder Kompressensysteme eingebunden sein müssen, um an den Steinoberflächen längere Zeitabschnitte zu überleben. Auch eine Woche nach Abnahme konnten noch zahlreiche vitale Zellen nachgewiesen werden. Solange genügend Nährstoffe zur Verfügung stehen, scheint der Luftsauerstoff keinen negativen Einfluss auf die Bakterientätigkeit zu haben.

Durch die mikroskopischen Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass die Bakterien den Transport zur Applikation sowie die drei- bis sechstägige Applikation überleben und nachweisbar die Steinoberflächen, auch über den Applikationszeitraum hinaus, frequentieren. Inwieweit die Biomasse oder die mit der Bakterientätigkeit verbundenen Abfallprodukte sowie die Kompressenbehandlung die Steinoberflächen verändern, sollte durch weitere Untersuchungen ermittelt werden.

Die durch die Bakterientätigkeit an den Steinoberflächen verursachten Veränderungen wurden weiterhin im Rasterelektronenmikroskop überprüft. Die Aufnahmen ergaben keine eindeutigen Unterschiede der Probeflächen vor und nach der Bakterienapplikation. Die Oberflächen der meisten Proben zeigten Gipskrusten unterschiedlicher Ausformung.

In den Aufnahmen waren keine Bakterien und auch keine über das normale Maß hinausgehende Besiedlung der Oberflächen durch andere Mikroorganismen zu erkennen. Die mit Carbopol behandelten Oberflächen zeigten keine Unterschiede zu unbehandelten oder mit Folienkompressen versehenen Steinbereichen. Dagegen war bei der Ammoniumcarbonat- Kompresse eine wesentliche Veränderung der Steine zu erkennen, die mit der Salzumwandlung und Um- Kristallisation in Zusammenhang steht.

Unklar bleibt, ob und auf welche Art und Weise die Bakterien von den Oberflächen verschwinden: denkbar wäre, dass die toten Bakterien von den Oberflächen abfallen. Weiterhin kann aber auch der durch die Kompressenflüssigkeit in Lösung gegangene Gips nach einiger Zeit an der Oberfläche der Probe auskristallisiert sein Die Bakterien könnten von dieser Gipskruste überdeckt worden sein. Der Verbleib der Mikroorganismen sollte in Folgeversuchen überprüft werden.

2. Untersuchungen zu den durch die Kompressenbehandlungen verursachten Veränderungen der Oberflächen

An den Oberflächen der Steinsubstanz waren leichte Aufhellungen festgestellt worden, die auf die Behandlung mit den unterschiedlichen Biokompressen zurückgeführt wurden. In weiteren Untersuchungen sollte ermittelt werden, ob die Bakterien die aufliegenden Gipskrusten reduziert hatten und ob es auch zu einer Veränderung der Struktur gekommen war.

Im Labor und am Hildesheimer Dom wurden Mirowskimessungen zur Flüssigkeitsaufnahme durchgeführt. Weiterhin wurden mit der Biokompresse behandelte Oberflächen einem Wasserdampfdiffusionstest unterzogen und mit unbehandelten Oberflächen verglichen. Für die Überprüfung der Veränderung der Oberflächen durch Carbopol wurde ein zweiter Wasserdampfdiffusionstest an Steinplättchen mit einer Carbopol- Behandlung durchgeführt. Das umfangreiche Probenmaterial wurde einem qualitativen und einem quantitativen Sulfatnachweis unterzogen.

2.1. Flüssigkeitsaufnahmeverhalten

An den Probeflächen im Labor und im Nordparadies des Hildesheimer Domes wurden zwei Tage nach Abnahme der Kompressen Mirowski- Messungen in verschiedenen Probeflächen durchgeführt. An den Probeflächen in Polen war die Durchführung der Mirowskimessung aus Zeitgründen nicht möglich.

Abb. 46 und 47 Mirowski- Messungen an den Probeflächen 1 und 6 im Hildesheimer Dom

Bei dem Mirowski[252]- Verfahren handelt es sich um eine zerstörungsfreie Methode zur Prüfung der kapillaren Aufnahmegeschwindigkeit von Wasser und anderen Flüssigkeiten. Mit einem mit Flüssigkeit gefüllten Messröhrchen (Kapillartränkungsprüfer) wird der Aufnahmegrad des Steines überprüft. Anhand der Ergebnisse kann eine Aussage über Eigenschaften der Oberfläche wie Verdichtung, Hydrophobierung und deren Wirksamkeit und Effektivität der Reinigung bzw. Krustenentfernung getroffen werden. Niedrige Werte des Aufnahmegrades und der (Saug-) Geschwindigkeit deuten auf eine stark verdichtete oder hydrophobierte Oberfläche hin. Berücksichtigt werden bei der Interpretation die Kapillaraufnahmegeschwindigkeit der Flüssigkeit, der Flüssigkeitsaufnahmegrad und damit verbunden die Größe des Flüssigkeitsfleckes, der sich um die Messstelle aufgrund der kapillar aufgenommenen Flüssigkeit an der Gesteinsoberfläche abzeichnet.

Für das Mirowski- Prüfverfahren wurden im Labor und im Hildesheimer Dom je ein unbehandelter Oberflächenbereich ausgewählt, außerdem eine Testfläche, die mit einer Carbopol- Kompresse versehen war und ein mit einer PP- Folie behandelter Bereich. Die Nullprobe sollte den Vergleich ermöglichen und damit Erfolg der Behandlungen mit den „Biokompressen“ belegen.

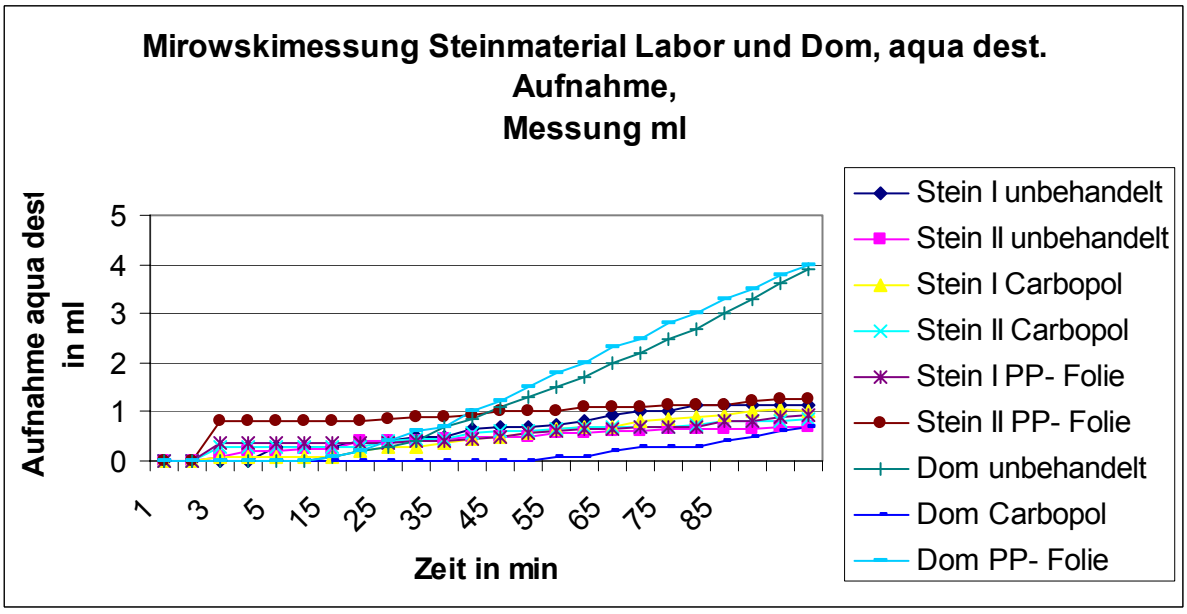
Eine Messstelle wurde jeweils mit Wasser und Schellsol D 40[253] auf ihre kapillaren Eigenschaften hin untersucht. Nur der Vergleich der Aufnahme von unterschiedlichen Lösemitteln ermöglicht eindeutige Aussagen über mögliche Verdichtung der Gesteinsoberfläche bzw. hydrophobe Eigenschaften an dieser Messstelle etc[254]. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden die Messungen für aqua dest. und Schellsol D 40 parallel durchgeführt. Dabei wurden Bereiche mit möglichst identischer Krustenentwicklung ausgewählt und untersucht. Schwankungen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Die Mirowskiröhrchen wurden mit Hilfe eines Ständers vor den Objektoberflächen montiert und an die Oberflächen gefügt. Die Messungen der Wasseraufnahme in ml sowie des Feuchtefleck- Durchmessers erfolgte innerhalb der ersten fünf Minuten minütlich, danach im 5-Minuten- Takt. Die Messungen wurden nach jeweils 90 min abgebrochen. Die Tabellen sind im Anhang beigefügt.

Bei allen Messungen mit aqua dest. und mit Schellsol D 40 konnte eine schnelle Vergrößerung des Feuchteflecks beobachtet werden, während die Flüssigkeitsaufnahme eher gering war. Die Ergebnisse der Messungen sind im Anhang beigefügt.

[252] Kapillartränkungsprüfer, Patent Nr. 125504.
[253] Schellsol D 40 wurde als Lösemittel ausgewählt, da es im Rahmen der vorher im Nordparadies durchgeführten Untersuchung des Bauteils durch Kalff ebenfalls verwendet worden war.
[254] Kalff 2005, Anhang

Die Auswertung der Ergebnisse der Mirowski- Messung ergab für die Behandlung mit aqua dest. als auch für die Durchführung des Versuchs mit Schellsol D 40 bei beiden Objekten keine stark von dem unbehandelten Stein abweichenden Ergebnisse. Die Ergebnisse der Messungen in allen drei Testfeldern liegen sehr nah beieinander. Auffällig ist, dass die Werte der aqua dest.- Messung im Dom deutlich über den Ergebnissen aus dem Labor liegen, das Steinmaterial also generell saugfähiger ist.



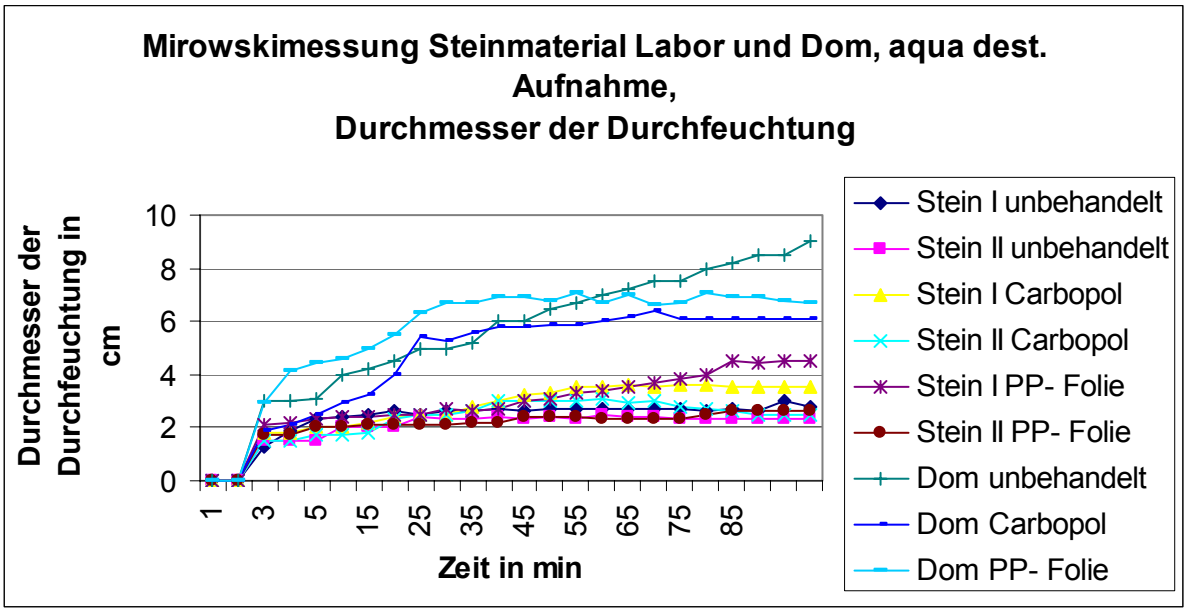
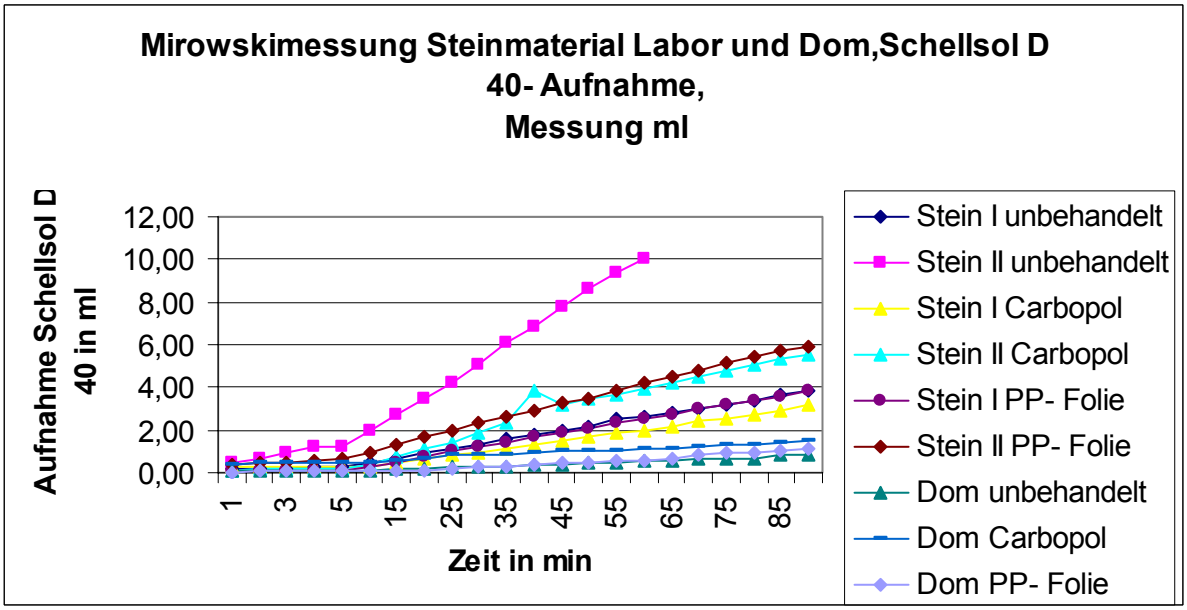


Abb. 48 und 49 Mirowskimessung der Wasseraufnahme an Steinmaterial im Labor und am Hildesheimer Dom

Das Diagramm der Wasseraufnahme in ml (Abb. 48) zeigt, dass die Wasseraufnahme in den ersten zwei Minuten in allen Probeflächen nahezu gleich verläuft. Die Wasseraufnahme der mit PP- Folie versehenen Testfläche an Stein II steigt dann spontan an. Danach ist für das Probematerial im Labor kaum mehr eine Wasseraufnahme zu beobachten. Die Graphen der Labor- Testflächen verlaufen weitgehend deckungsgleich bei minimaler aqua dest.-Aufnahme.
Die Oberflächen am Dom ohne Behandlung und die mit einer PP- Folie behandelte Testfläche zeigten eine gleichmäßige parallele Wasseraufnahme, während in der mit Carbopol behandelten Oberfläche kaum Wasser aufgenommen wurde. Dies spricht für eine starke Verdichtung der Steinoberfläche, die vermutlich auf den Eintrag von Carbopol in das Gefüge zurückzuführen ist. Die Wasseraufnahme der Carbopol- Fläche am Dom liegt sogar unterhalb der Laborwerte.

Die Betrachtung des Feuchtefleckes während der Wasseraufnahme (Abb. 49) zeigt ebenfalls weitgehend parallel verlaufende Kurven für das Steinmaterial im Labor. Nach etwa 45 Minuten steigen die Werte der mit Carbopol und der mit PP- Folie behandelten Oberflächen auf Stein I noch einmal leicht an. In den übrigen Testfeldern kam es nach zwei Minuten zu keiner wesentlichen Veränderung mehr.
Auch die Ergebnisse der Messungen am Dom liegen für die drei unterschiedlichen Oberflächen nah beieinander, aber deutlich über den Laborwerten. Die Oberfläche am Dom ohne Behandlung zeigt eine weitgehend gleichmäßige Ausbreitung des Feuchtefleckes, während die mit PP- Folie und Carbopol behandelten Testflächen nach 30 Minuten keine weitere Ausdehnung der Durchfeuchtung aufweisen.

Parallel zur Wasseraufnahme wurde auch die Lösemittelaufnahme mit Schellsol D 40 in Mirowskimessungen überprüft. Durch diese Untersuchung kann ermittelt werden, ob die untersuchten Bereiche in einer früheren Konservierungsmaßnahme mit hydrophobierenden Konservierungsmitteln behandelt worden sind.



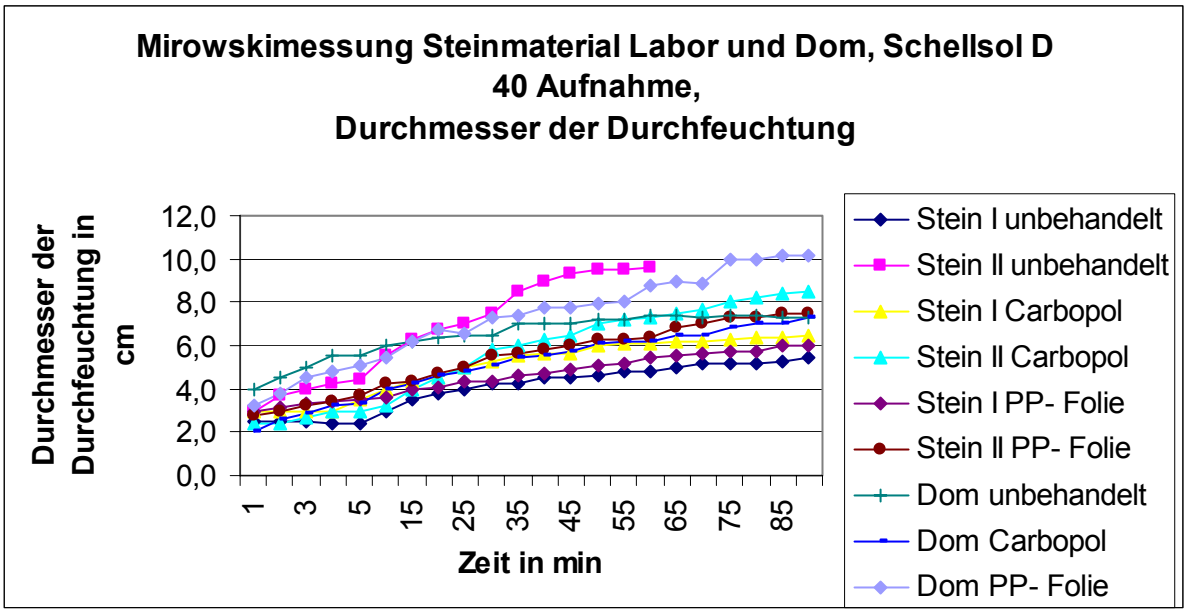


Abb. 50 und 51 Mirowskimessung der Schellsol D 40- Aufnahme

Die Ergebnisse der Mirowski- Messung mit dem Lösemittel Schellsol D 40 (Abb. 50) ergaben leicht von der aqua dest.- Messung abweichende Ergebnisse. Die Flüssigkeitsaufnahme der verschiedenen Steine war deutlich höher als bei dem Versuch mit aqua dest. Alle Graphen steigen nahezu gleichmäßig kontinuierlich leicht an. Die Werte der Probeflächen am Dom liegen deutlich unter den Werten aus dem Labor.

Die Graphen der Messungen im Labor verlaufen während der ersten 10 Minuten nahezu identisch. Die unbehandelte Probefläche an Stein II zeigt danach deutlich über den anderen Oberflächen liegende Ergebnisse für die Schellsol- Aufnahme, während in den übrigen

Probeflächen die weitere Lösemittelaufnahme nahezu gleichmäßig steigt. Nach 60 Minuten waren die 10 ml, die das Mirowski- Röhrchen fasst, auf der unbehandelten Fläche des Steines II komplett in den Stein eingedrungen. Ebenso lag auch der Durchmesser des Feuchtebereiches deutlich über den übrigen Ergebnissen. Nur die mit PP- Folie behandelte Probefläche am Dom zeigte einen ähnlich großen Durchmesser des Feuchteflecks.
Die Werte für die Probeflächen an Stein II lagen generell leicht über denen von Stein I. Die Graphen der drei Testflächen an Stein I laufen sowohl bei der Schellsol D 40- Aufnahme in ml als auch bei den Feuchtedurchmessern (Abb. 51) nahezu deckend. Die Abweichungen sind minimal und liegen damit absolut im tolerierbaren Bereich.
Bei den Messungen am Dom liegen alle drei Graphen der Aufnahme in ml sehr nah beieinander. Die Lösemittelaufnahme zeigt wiederum für die unbehandelte Oberfläche sowie die mit PP- Folie behandelte Oberfläche nahezu identische Ergebnisse. Ebenso weicht die Carbopol- Kompresse leicht von den beiden anderen Testflächen ab, wobei sie eine minimal stärkere Lösemittelaufnahme zeigt. Die Durchmesser der Feuchtepunkte sind weitgehend gleich und zeigen keine erheblichen Unregelmäßigkeiten. In der mit PP- Folie behandelten Fläche breitete sich der Feuchtefleck etwas stärker aus. Anders als bei der Wasseraufnahme stagniert bei der Lösemittel- Aufnahme das Ergebnis für die unbehandelte Fläche nach 60 Minuten, während die behandelten Flächen bis zum Abbruch der Messungen Zunahme zeigen.

Die Mirowskimessungen ergeben, dass durch die Kompressenbehandlung im Labor und am Dom keine wesentlichen Veränderungen in Bezug auf die Wasseraufnahme eingetreten sind. Lediglich die mit Carbopol behandelte Oberfläche am Dom zeigt eine deutlich schwächere Wasseraufnahme. Dies ist wahrscheinlich auf den Eintrag der Acrylsäure-Polymere zurückzuführen. Auffällig ist weiterhin die starke Lösemittelaufnahme an der unbehandelten Oberfläche des Steins II im Labor. Möglicherweise zeigt das Gefüge in diesem Bereich eine Schwächung.
In keinem Fall ist es durch die Bakterienapplikation zu einer massiven Verdichtung des Porenraumes und damit verbundener eingeschränkter Wasseraufnahme gekommen. Diese wäre auch in der Wasseraufnahme- Messung deutlich geworden. Allerdings beweisen die Ergebnisse der Mirowskimessung auch kein positives Ergebnis der Bakterienapplikation.
Generell ist das im Labor beprobte und am Dom verbaute Steinmaterial sehr dicht. Dies kann auf frühere partielle Festigungsmaßnahmen hinweisen. Möglicherweise geht die Verdichtung aber auch nicht auf frühere Behandlungen, sondern auf die intensive Bildung von Gipskrusten zurück, die zu einer Verstopfung des Porenraumes geführt hat[255]. Die

[255] s. Abb. 4, Bild b, c und d, S. 14.

Abweichungen zwischen unbehandelten und behandelten Oberflächen sind generell als sehr gering zu bewerten.
bei den Mirowskimessungen ist zu berücksichtigen, dass die Krusten auf Natursteinen sehr unregelmäßig sind. Selbst wenn sie optisch weitgehend identisch erscheinen, kann es doch in ihrer Zusammensetzung zu erheblichen Unterschieden kommen. So sind die Messungen der Wasser- und Lösemittelaufnahme nach Mirowski unter Vorbehalt zu betrachten.
Die Applikation der Bakterien auf die Steinoberflächen hat zu keiner Verschlechterung des Feuchtehaushaltes in den untersuchten Steinen geführt. Allerdings zeigt die Mirowskimessung auch, dass die Bakterien nicht in der Lage sind, das verstopfte Porengefüge durch die Verwertung des Gipses zu öffnen. Die Verdichtung der Probefläche durch Carbopol am Dom muss weiter überprüft werden.

2.2. Messungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Überprüfung der Flüssigkeitsaufnahme hatte keine wesentlichen Veränderungen der Oberflächen nach der Applikation der Biokompressen gezeigt. In einem weiteren Versuch sollten behandelte Probeflächen einem Wasserdampfdiffusionstest gemäß DIN 52 615[256] unterzogen werden. Dieser sollte aufzeigen, ob das Porensystem der unterschiedlichen behandelten Gesteine Veränderungen zeigt.

Durch die Wasserdampfdurchlässigkeit wird die Masse des Wasserdampfes ermittelt, der unter der Wirkung des innerhalb einer Probe vorhandenen Wasserdampfteildruckgefälles durch die Probe diffundiert. Berücksichtigt werden dabei Fläche, Zeit und Druckgefälle. Um die Probe herum wird ein Konzentrationsgefälle durch hohe Luftfeuchtigkeit auf der einen Seite (in dem Messgefäß) und niedrige auf der anderen (nahezu 0% relative Luftfeuchte in einem Exsikkator) geschaffen. Der Wasserdampf zeigt das Bestreben, einen Konzentrationsausgleich zu schaffen und muss daher die Probe passieren. Dies kann nur über eine definierte Fläche der Probe geschehen, da die Seitenflächen abgedichtet sind[257].
Im Vergleich von unbehandelten Proben mit behandelten wird deutlich, ob die Plättchenoberflächen durch die Behandlung eine veränderte Wasserdampfdurchlässigkeit aufweisen.

[256] s. Anhang, DIN 52615.
[257] Eine umfangreiche Erläuterung des Messverfahrens gemäß DIN 52 615 findet sich bei D´ham, 2003.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ berechnet sich gemäß der Formel[258]:

$$\mu = \frac{\delta_L \cdot p_s \cdot \Delta a \cdot A \cdot t}{s \cdot \Delta m} \quad \frac{s_L}{s}$$

Dabei sind:

δ_L	Wasserdampfdiffusionskoeffizient der Luft (abhängig von Temperatur und Luftdruck)
p_s	Partialdruck der gesättigten Luft (temperaturabhängig)
Δa	Differenz der relativen Luftfeuchte
A	Fläche der Probe
t	Zeit
s_L	mittlere Dicke der Luftschicht im Prüfgefäß unterhalb der Probe
s	Schichtdicke der Probe
Δm	Gewichtsänderung

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ ist dimensionslos.

Da für die Versuchsdurchführung nur begrenzt natürlich verkrustetes Steinmaterial zur Verfügung stand, wurde der Versuch zweimal an denselben Steinplättchen durchgeführt. Zunächst wurde unbehandeltes Steinmaterial beprobt.

Abb. 52 Wasserdampfdiffusionsversuch im Labor

Aus dem im Labor vorhandenen Steinmaterial des Sandsteins II wurden Krustenprobenplättchen in der Größe 2,5 x 2,5 cm mit einer Höhe von 0,5 cm gesägt. Diese wurden auf kleinen Plexiglasgefäßen, die bis zur Hälfte mit aqua dest. gefüllt waren, mit Terostat befestigt. Das Anfangsgewicht wurde ermittelt. Die Proben wurden für die Versuchsdauer von sechs Tagen im Exsikkator gelagert und täglich gewogen.

[258] D´ham 2003, S. 8.

Nachdem sich ein konstanter Diffusionsstrom eingestellt hatte und die Gewichtsveränderung an den Proben linear erschien, wurden die Messungen abgebrochen. Die Probeflächen wurden für drei Tage mit Kompressenfolien aus PP- Folie und einer Bakteriensuspensions-Puffer- Mischung im Verhältnis 1:4 versehen und im Labor gelagert. Parallel wurde auf einem Steinplättchen eine Wasserkompresse appliziert. Anschließend wurde der Versuch an den behandelten Probekörpern wiederholt.

Durchschnittswerte der Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl µ	
Proben ohne Behandlung (n=6)	**24,14**
Nullprobe (n=1)	**26,42**
Proben mit Behandlung (n=6)	**13,72**
Wasserkompresse (n=1)	**14,77**

Tabelle 13 Durchschnittswerte der Wasserdampfdiffusions- widerstandszahl µ

Die behandelten Proben zeigten einen deutlich niedrigeren Wasserdampf-diffusionswiderstand von 13,72 als die unbehandelten mit 24,14. Die Wasserkompresse lag mit einer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 14,77 deutlich näher am Ergebnis der gereinigten Oberflächen.
Die Bakterien sind in der Lage, den Gips im Gefüge, der eine starke Verdichtung der Oberflächen herbeigeführt hat, erheblich zu reduzieren. Nach der Kompressenbehandlung liegt ein deutlich offeneres System vor, das dem Stein die Reaktion mit der Umgebung ermöglicht. Eine Verdichtung des Porenraumes durch das Einbringen der Bakterien hat nicht stattgefunden.
Die Wasserkompresse war ebenfalls in der Lage, eine bessere Wasserdampfdiffusion herbeizuführen. Dies hängt vermutlich mit dem Abwaschen von aufliegendem Schmutz von der Steinoberfläche zusammen. Dennoch erreichen die Bakterien eine geringfügig stärkere Porenöffnung.

2.3. Wasserdampfdiffusionsversuch zur Überprüfung der Verdichtung der Oberflächen durch Carbopol

Die Mirowski- Messungen im Hildesheimer Dom hatten für die mit Carbopol behandelten Oberflächen zum Teil stark abweichende Ergebnisse in der Wasseraufnahme gezeigt. Daher sollten mit Carbopol behandelte Probeplättchen ebenfalls einem Wasserdampfdiffusionstest gemäß DIN 52 615[259] unterzogen werden. Es galt zu ermitteln, ob die Verwendung des Carbopols eine Verdichtung der Oberflächen verursacht, die durch die Überprüfung der Wasserdampfdiffusion ermittelt werden kann. Diese Verdichtung wirkt möglicherweise einer

[259] s. Anhang, DIN 52615.

durch die Bakterientätigkeit verursachten Öffnung des Porengefüges durch deren Verwerten des Sulfats entgegen.

Für den Versuch wurden Probeplatten mit den Maßen 6 x 7 x 1 cm aus einem der Laborsteine aus Dresden gesägt. Das Steinmaterial wies keine natürlichen Gipskrusten auf. Die 21 Probeplatten trockneten unter Laborbedingungen aus und wurden anschließend mit Carbopol- Kompressen versehen. Dabei wurden jeweils drei Plättchen identisch, wie aus der Tabelle ersichtlich, behandelt.

Probennummer	Applizierte Desulfovibrio- Art	Trennschicht	Nachbehandlung
V1	D. vulgaris	mit Japanpapier	keine
V2	D. vulgaris	mit Japanpapier	keine
V3	D. vulgaris	mit Japanpapier	keine
V4	D. vulgaris	ohne Japanpapier	Wasserdampf
V5	D. vulgaris	ohne Japanpapier	Wasserdampf
V6	D. vulgaris	ohne Japanpapier	Wasserdampf
V7	D. vulgaris	ohne Japanpapier	keine
V8	D. vulgaris	ohne Japanpapier	keine
V9	D. vulgaris	ohne Japanpapier	keine
D1	D. desulfuricans	mit Japanpapier	keine
D2	D. desulfuricans	mit Japanpapier	keine
D3	D. desulfuricans	mit Japanpapier	keine
D4	D. desulfuricans	ohne Japanpapier	Wasserdampf
D5	D. desulfuricans	ohne Japanpapier	Wasserdampf
D6	D. desulfuricans	ohne Japanpapier	Wasserdampf
D7	D. desulfuricans	ohne Japanpapier	keine
D8	D. desulfuricans	ohne Japanpapier	keine
D9	D. desulfuricans	ohne Japanpapier	keine
OB1	ohne Behandlung	keine	keine
OB2	ohne Behandlung	keine	keine
OB3	ohne Behandlung	keine	keine

Tabelle 14 Behandlung der Probeplättchen aus Elbsandstein für die Wasserdampfdiffusions- Untersuchungen

Die Kompressen verblieben sechs Tage auf den Oberflächen. Sie wurden während der ersten drei Tage zweimal täglich nachgefeuchtet, anschließend trockneten die Kompressen auf. Nach sechs Tagen wurden die Kompressen vorsichtig von den Oberflächen entfernt. Dabei ließen sich die Plättchen, auf denen eine Japanpapierlage als Trennschicht aufgebracht worden war, deutlich leichter von der Kompressenpaste befreien.

Die Plättchen wurden mit Pinsel und aqua dest nachgereinigt. Jeweils die mit der Kennung 4, 5 und 6 gekennzeichneten Steinplättchen wurden zusätzlich mit Heißdampf gereinigt. Anschließend trockneten die Proben erneut über Nacht aus. Am nächsten Tag wurden die Gefäße für die Wasserdampfdiffusionsmessung gereinigt und bis zu einer definierten Höhe mit aqua dest. (164 ml) gefüllt. Damit war innerhalb der Schalen eine Luftfeuchtigkeit von

annähernd 100% gegeben. Die Steinplättchen wurden auf die offene Gefäßseite aufgelegt und mit Terostat seitlich abgedichtet und befestigt. Damit war eine Wasserdampfdiffusion nur durch die definierte Probenfläche nach oben möglich.
Die insgesamt 21 Gefäße wurden in drei Exsikkatoren mit Silicagel, in denen eine relative Luftfeuchte von annähernd 0% gegeben war, für 10 Tage gelagert. Täglich wurde die Wasserdampfdiffusion durch die Gewichtsabnahme gravimetrisch ermittelt. Nach 10 Tagen hatte sich ein konstanter Diffusionsstrom eingestellt, und die Gewichtsveränderung an den Proben erschien linear. Die Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl μ wurde gemäß der obigen Formel[260] berechnet.

Durchschnittswerte der	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	
ohne Behandlung Ø (n=3)	254,50
mit Japanpapier ohne Nachreinigung Ø (n=6)	493,72
ohne Japanpapier mit Heißdampf Ø (n=6)	495,89
ohne Japanpapier ohne Nachreinigung Ø (n=6)	418,25

Tabelle 15 Durchschnittswerte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Die Ermittlung der Diffusionswiderstandszahl ergab für die unbehandelten Oberflächen einen Durchschnittswert von 254,50. Der Vergleich der unterschiedlichen Behandlungsformen ergab für die Plättchen mit Japanpapier ohne Nachbehandlung einen Mittelwert von 493,72, für die Behandlung ohne Japanpapier mit Nachreinigung per Heißdampf 495,89 und für die Behandlung ohne Japanpapier und ohne Nachbehandlung einen Wert von 418,25. Der Wert für die dritte Behandlung ist deutlich niedriger als die beiden ersten und damit näher an dem Ergebnis der unbehandelten Oberflächen[261].
Aus der Ermittlung des μ- Wertes ergibt sich eine deutliche Veränderung der Oberflächen durch die Behandlung mit Carbopol, die durch die einfache Betrachtung der Graphen zur Gewichtsabnahme nicht deutlich wurde. Die Oberflächen scheinen massiv verändert und zeigen einen deutlich höheren Widerstand gegenüber Wasserdampf. Es ist davon auszugehen, dass das Carbopol den Porenraum im Bereich der obersten Gesteinsschichten zusetzt und verstopft, so dass nur noch ein eingeschränkt offenporiges System vorliegt. Die Nachreinigung mit Heissdampf scheint das Carbopol weiter in das Gefüge einzutreiben und damit zu einer stärkeren Verdichtung zu führen. Sie sollte demnach am Objekt unter keinen Umständen erfolgen.

[260] s. Teil 3, II 2.2.a, Messungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit, S. 113.
[261] Die Einzelwerte der unterschiedlich behandelten Steinplättchen sind im Anhang, Tabelle 9, aufgeführt.

Die hohen µ- Werte für das mit Carbopol behandelte Material bestätigen die in den Vorversuchen gewonnene Erkenntnis, dass es möglichst vermieden werden sollte, Carbopol auf offenporigen Oberflächen einzusetzen, von denen es schwer wieder zu entfernen ist.
Unklar bleibt, warum die Steinoberflächen ohne Trennschicht und ohne Nachreinigung das beste Ergebnis liefern. In den Vorversuchen zu den Kompressenmaterialien hatte sich ergeben, dass die Trennschicht aus Japanpapier für die Entfernung des Carbopols von den Oberflächen sehr hilfreich ist. Der ermittelte Wasserdampfdiffusionswiderstand widerspricht dem.
Die µ- Werte der beiden Wasserdampfdiffusions- Messungen wurden auf 10 cm² umgerechnet, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

µ- Werte der Wasserdampfdiffusion an Plättchen mit Bakterienkompresse umgerechnet auf 10 cm²

	ermittelter µ- Wert	µ- Wert auf 10 cm²
Proben ohne Behandlung	**24,14**	**38,63**
Nullprobe	**26,42**	**42,27**
Proben mit Behandlung	**13,72**	**21,95**
Wasserkompresse	**14,77**	**23,63**

µ- Werte der Wasserdampfdiffusion an Carbopol- Plättchen umgerechnet auf 10 cm²

	ermittelter µ- Wert	µ- Wert auf 10 cm²
mit Japanpapier ohne Nachbehandlung	**493,72**	**117,55**
ohne Japanpapier mit Heissdampf	**495,89**	**118,07**
ohne Japanpapier ohne Nachbehandlung	**418,89**	**99,74**
ohne Behandlung	**254,50**	**60,60**

Tabelle 16 Vergleich der µ- Werte der 1. und 2. Messung zum Wasserdampfdiffusionswiderstand

Das frisch gesägte Steinmaterial zeigte mit durchschnittlich 60,61 für unbehandelte Probeplättchen gegenüber 38,63 für das verkrustete Steinmaterial einen deutlich höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand. Dies geht vermutlich auf Steinstaub, der sich während des Sägens der Proben in den oberflächennahen Bereichen angesammelt hat, zurück. Bei der Behandlung mit Bakterienkompressen in Folien kam es zu einer Öffnung der Poren und einem Absinken des Wasserdampfdiffusionswiderstands. Dagegen konnte bei den Carbopol-Kompressen durch alle Behandlungen eine Erhöhung der Wasserdampf-diffusionswiderstandszahl und damit eine Verdichtung der Oberflächen beobachtet werden.

Bei der Auswertung des Versuchs ist zu berücksichtigen, dass frisch gesägtes, nicht verkrustetes Steinmaterial verwendet wurde. Der Versuch sollte auf Steinmaterial mit natürlichen Gipskrusten wiederholt werden. Dabei kann auch ermittelt werden, inwieweit die Verdichtung des Porenraumes durch Carbopol und die Öffnung desselben durch die Bakterientätigkeit einander entgegen wirken.

2.4. Anfärbung des Probenmaterials

Um zu überprüfen, inwieweit der Gips aus der Kruste und den oberen Kornlagen durch die Applikation der Bakterien entfernt werden konnte, wurden ausgewählte Proben einem Gipsnachweis nach Matteini[262] unterzogen. Dabei sollte durch Vergleich von Probenmaterial des Vor- und Endzustandes optisch ermittelt werden, ob durch die Bakterienapplikation eine Reduktion des Gipses im Gefüge herbeigeführt wurde.
Die Proben wurden zunächst in Technovit eingebettet und seitlich angeschliffen. Damit war eine Betrachtung der Schichtenabfolge bzw. der auf dem Steinmaterial liegenden Krusten möglich. Auf den Querschliff wurde ein Tropfen Bleinitrat gegeben und dieser anschließend im Abzug deponiert, bis die Lösung eingezogen war. Dann wurde die Probe zwei- bis dreimal mit einzelnen Tropfen aqua dest. behandelt, bis diese ebenfalls eingezogen waren. Bei dieser Behandlung bildet sich bei Vorhandensein von Gips farbloses oder weißliches Bleisulfat. Anschließend wurde ein kleiner Tropfen einer Natriumrhodizonat- Lösung bis zur Absorption auf den Querschliff gegeben. Dabei entsteht durch Komplexbildung aus dem Bleisulfat das unlösliche violette Bleirhodizonat. Dieses zeigt die Position des Gipses im Gefüge an.

[262] s. Anhang, Gipsnachweis Matteini, Email vom 24.03. 2005.

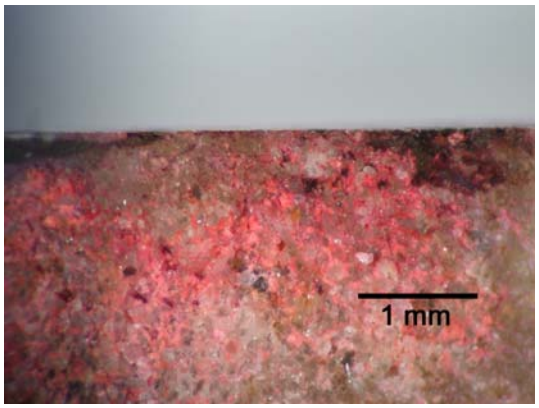


Abb. 53 Probe eines Vorzustandes des Laborsteines I

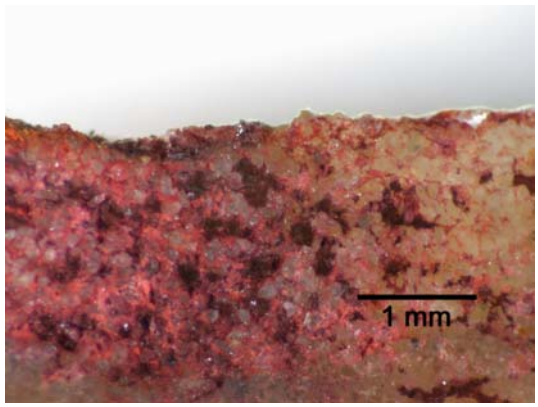


Abb. 54 Probe des Laborsteines I nach Bakterienapplikation

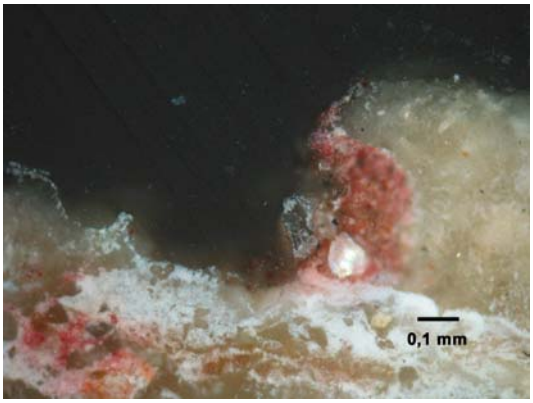
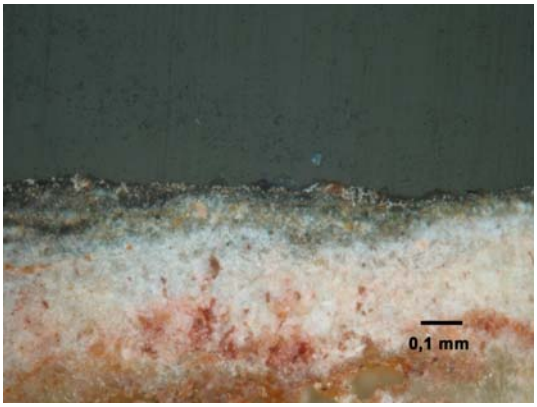


Abb. 55 Proben eines Vorzustandes im Hildesheimer Dom

Die Betrachtung des angefärbten Probenmaterials ergab sehr unterschiedliche Ergebnisse. Teilweise konnte eine Reduzierung des Gipsgehaltes durch den Vergleich der Vorzustands- mit der Endzustandsprobe bestätigt werden. Bei anderen Proben zeigte der Endzustand ebenso hohe oder sogar höhere Gipsbelastung als der Vorzustand (Abb. 53 und 54).



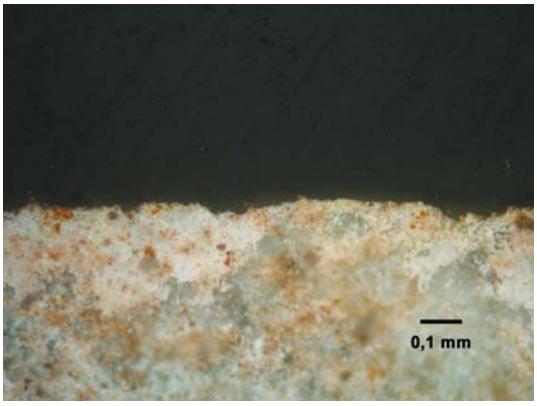


Abb. 56 und 57 Proben des Endzustandes aus dem Nordparadies des Hildesheimer Domes

Die Betrachtung anderer Proben zeigte deutlich die Reduzierung des Gipses aus den oberen Gesteinslagen, in tieferen Schichten dagegen liegt weiterhin Gips vor (Abb. 56). In einigen Bereichen konnte der Gips durch die Behandlung der Oberflächen mit Bakterien fast vollständig aus dem Gestein entfernt werden (Abb. 57).

Der „qualitative“ Gipsnachweis nach Matteini kann nur begleitend zur Verdeutlichung der Position des Gipses im Gefüge in die Bewertung der Wirksamkeit der Bakterienkompressen mit einfließen. Ein direkter Vergleich einer Vor- mit einer Endzustandsprobe zeigt oft wesentliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Krustenprobe. Die Anfärbung verdeutlicht vor allem die Inhomogenität des Steinmaterials.
Weiterhin wurde durch die Anfärbung der Querschliffe deutlich, wie markant sich Krustenproben desselben Steines, die im Abstand von wenigen Millimetern genommen wurden, in Struktur und Gipsgehalt, aber auch in der Textur unterscheiden können.
Eine zusammenfassende Bewertung der Wirksamkeit der Bakterienkompressen erscheint nach diesem Versuch nicht möglich. Deutlich wurde aber, dass auch nach der Kompressenbehandlung in den meisten Proben noch Gips nachweisbar enthalten ist.

2.5. Quantitativer Sulfatnachweis

Zur wissenschaftlichen Überprüfung des Angriffs der Bakterien auf die Steinoberflächen wurden die Vor- und Endzustandsproben des gesamten Labor- und Domversuchs sowie ausgewählte Proben aus Polen einem Sulfat- Test Spectroquant der Firma Merck unterzogen. Durch den Vergleich des Vor- mit den Endzuständen kann die Sulfatreduzierung quantitativ aufgezeigt werden.
Bei dem quantitativen Sulfatnachweis Spectroquant SO_4^{2-} reagieren die Sulfationen mit Bariumjodat unter Freisetzung von Iodat- Ionen. Diese oxidieren Tannin zu einer braunroten Verbindung, die photometrisch bestimmt werden kann[263]. Durch Zugabe der Reagenzien wird die Probenlösung angefärbt. Der Sulfatgehalt der Probe wird im Photometer durch Abgleich mit einer Eichreihe ermittelt.
Das Probenmaterial jeder einzelnen Probe wurde gemörsert. Das Probematerial der drei Proben aus einer Testfläche aus dem Hildesheimer Dom und von Schloss Książ wurde zusammengegeben und gemischt, um einen Mittelwert zu erreichen. Das Steinmehl wurde anschließend 1:100 in aqua dest gelöst. Von dieser Lösung wurden jeweils 2,5 ml in Greiner-Röhrchen überführt und zwei Tropfen der Reagenz 1 zugegeben und die Lösung gemischt. Weiterhin wurde ein Mikrolöffel der Reagenz 2 zugefügt, erneut vermischt und das Röhrchen verschlossen für 5 Minuten in einem Wasserbad (40°C) erwärmt. Anschließend wurden 2,5 ml der Reagenz 3 mit Pipette zugegeben und die Lösung für 5 Minuten bei 5000 Umdrehungen/min zentrifugiert. Dabei fiel am Röhrchenboden ein weißer Niederschlag aus. Aus dem oberen Bereich der Lösung wurden mit der Pipette 2,5 ml entnommen und in ein neues Greiner- Röhrchen überführt.

[263] Merkblatt Sulfat- Test Spectroquant, Nr. 1.14791.0001.

Es wurden zwei Tropfen der Reagenz 4 zugegeben, die Lösung geschüttelt und anschließend erneut für 7 Minuten im Wasserbad erwärmt. Die inzwischen verfärbte Lösung wurde in eine Küvette umgefüllt und im Photometer ausgewertet. Ebenso wurde mit allen untersuchten Proben verfahren.

2.5.a. Photometer

Bei der Photometrie handelt es sich um ein optisches Messverfahren, in erster Linie für die Messung von Stoffkonzentrationen. Der in einem Lösungsmittel gelöste Stoff absorbiert Licht einer vorgegebenen Wellenlänge.

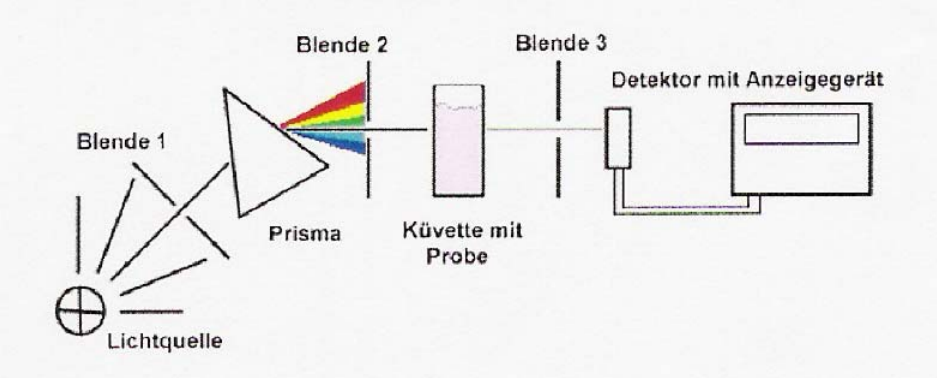


Abb. 58 Prinzip der Photometermessung

Am Ausgang der Messküvette, die die Messlösung enthält, wird eine Lichtintensität I gemessen. Diese wird zu der Lichtintensität I_0 in Beziehung gesetzt, die man misst, wenn die Küvette nur das Lösungsmittel ohne den gelösten Stoff enthält. Es gilt dann die als Lambert-Beersches Gesetz bezeichnete Beziehung

$$I/I_0 = e^{-\varepsilon cd}$$

Dabei ist:

ε = stoffspezifischer und wellenlängenabhängiger Extinktionskoeffizient
c= Stoffkonzentration
d= Schichtdicke der Lösung in der Messküvette

Die Extinktion ist abhängig von der Stoffkonzentration c und der Dichte d der Lösung. Daraus ergibt sich die Gleichung ε x c x d (=I/I_0). Sie ist bei bekanntem Extinktionskoeffizienten und bei bekannter Schichtdicke ein lineares Maß der Stoffkonzentration[264].

[264] Wartenberg 1989, S. 58.

Zur Erstellung der Eichkurve wurde zunächst eine Verdünnungsreihe von Sulfat hergestellt. Als Sulfatsalz wurde Ammoniumsulfat [$(NH_4)_2$ SO_4] ausgewählt und eine gesättigte Lösung als Standard hergestellt. Die Verdünnungsreihe sah Sulfatgehalte im Bereich zwischen 25 und 500 mg/SO_4^{2-} vor.
Die Messungen der Objektproben erfolgten bei einer Wellenlänge von 525 nm gegen eine 0-Probe. Die Berechnung erfolgte anhand der Eichkurve. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 im Anhang aufgeführt.

2.5.b. Ergebnis

Die Ergebnisse der Photometermessung zeigten für den Großteil der untersuchten Proben eine deutliche Sulfatreduzierung durch die Bakterienbehandlung. Lediglich eine der Laborproben (L2) sowie eine der Domproben (D5) wiesen nach der Behandlung einen höheren Sulfatanteil auf als vorher. Die Sulfatreduktion betrug zwischen 3 und 100%.

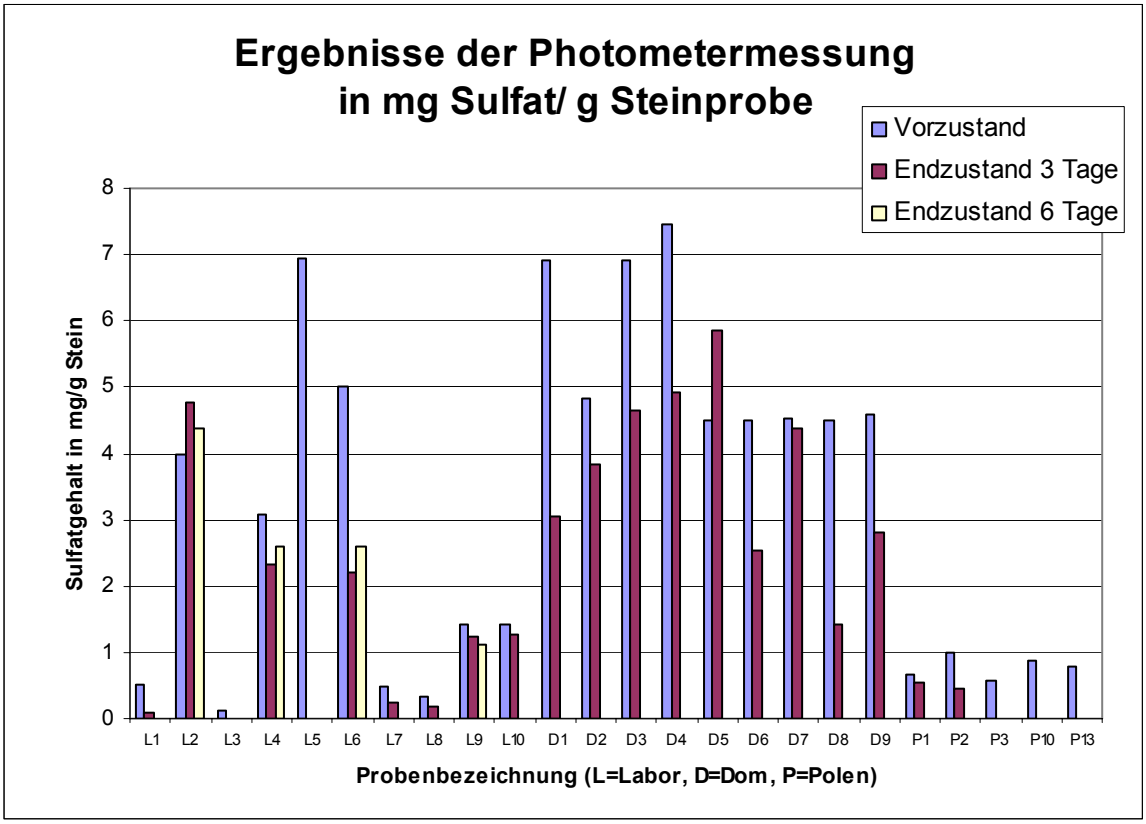


Abb. 59 zusammengefasste Ergebnisse der Photometermessungen

Die Tabelle verdeutlicht die starken Unterschiede des Sulfatgehaltes der Vorzustandsproben. Die Werte für das Laborsteinmaterial schwanken zwischen 3 und 70 mg/ g eingebrachtes Steinmaterial. Deutlich höher liegen die Ausgangs- Gipsbelastungen am Dom, die Mehrzahl der Proben zeigt für den Vorzustand Werte über 45 mg/g Stein. Die Werte des Steinmaterials aus Polen sind mit unter 10 mg/g Stein deutlich niedriger.

Die Photometermessung zeigt weiter, dass die im Labor durchgeführte verlängerte Applikation von 6 Tagen keine weitere Salzreduzierung verursacht. Die Werte des Probenmaterials liegen partiell sogar über denen der dreitägigen Applikation.
Sehr gute Ergebnisse konnten bei folgenden Proben ermittelt werden:

Objekt	Probenbezeichnung	Behandlung	Sulfatreduktion in %
Labor	L1 Stein II	D. vulgaris, PP- Folie 2-schichtig	80
Labor	L3 Stein II	D. vulgaris, PP- Folie 3-schichtig	92
Labor	L5 Stein II	D. vulgaris, Carbopol	100
Labor	L6 Stein I	D. desulfuricans, Carbopol	63
Labor	L7 Stein II	reines aqua dest., PP- Folie 2-schichtig	52
Dom	D1	D. vulgaris, PP- Folie 2-schichtig	55
Dom	D6	D. desulfuricans, Carbopol	53
Dom	D8	unbeimpft, PP- Folie 3-schichtig	72
Polen	P2	D. desulfuricans, PP- Folie 3-schichtig	72
Polen	P3	D. vulgaris + D. desulfuricans, Carbopol	74
Polen	P10	D. desulfuricans, PP- Folie 3-schichtig	99
Polen	P13	D. vulgaris, Carbopol	100

Tabelle 17 Probeflächen mit besonders erfolgreicher Sulfatreduzierung

Dabei zeigte sich, dass die Sulfatreduzierung an Stein II aus dem Labor offensichtlich erfolgreicher als an Stein I war.
Die Bakterien beider Desulfovibrio- Stämme zeigten vergleichbare Sulfatreduktion. Sie scheinen demnach beide für die Applikation geeignet.
Überraschend ist das gute Ergebnis der reinen aqua dest.- Kompresse L7. Der Sulfatgehalt in der Probefläche ging um über 50% zurück.
Die Carbopol- Kompressen zeigen generell gute Wirksamkeit. Sowohl im Labor als auch in Polen konnte mit einer Carbopol- Kompresse mit Desulfovibrio vulgaris der Gips vollständig aus dem Gefüge entfernt werden. Dies gelang mit keiner der anderen Kompressen.
Die zum Vergleich aufgebrachten Ammoniumcarbonat- Kompressen L10 und D9 zeigen in der Sulfatreduzierung sehr unterschiedliche Ergebnisse. Während es im Labor zu einer Sulfatreduzierung von 10% kam, die deutlich unter dem Durchschnitt der übrigen Probeflächen liegt, konnte der Sulfatgehalt der Domprobe um fast 40% reduziert werden. Die Reinigung mit Ammoniumcarbonat erreichte damit am Dom ein Ergebnis, das sich durchaus mit den Bakterienkompressen vergleichen lässt.

3. Zusammenfassung des 3. Teils

Der Versuch der mikrobiellen Salzverminderung wurde mit den Bakterienkulturen Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans an verschiedenen Natursteinobjekten durchgeführt. Zwei Bauteile eines Barockbrunnens wurden umfangreich im Labor beprobt und behandelt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden an den Objekten Schloss Książ in Polen sowie im Nordparadies des Hildesheimer Domes umgesetzt. Für die Applikation wurden drei verschiedene Kompressensysteme verwendet: zwei verschiedene PP- Folien von unterschiedlichem Aufbau sowie Carbopol- Paste.

Bei den im Labor behandelten Objekten sowie am Hildesheimer Dom konnte einige Tage nach der Kompressenabnahme eine leicht optische Aufhellung der Oberflächen beobachtet werden.

Die Mirowski- Messungen zur Wasseraufnahme zeigten nach der Kompressenapplikation keine wesentlichen Veränderungen. Die behandelten Steinoberflächen erschienen nach wie vor sehr dicht und oberflächlich verschlossen. In dem mit einer Carbopol- Kompresse behandelten Objektbereich am Hildesheimer Dom wurde eine starke Verdichtung der Oberfläche nachgewiesen, die vermutlich auf das Einbringen des Acrylats zurückzuführen ist. Ein Verschließen der Poren durch die Bakterien konnte nicht beobachtet werden.

Die durchgeführten Messungen zum Wasserdampfdiffusionswiderstand zeigten in einem ersten Versuch ein Öffnen des Steines gegenüber dem Wasserdampf. Dies ist ganz wesentlich auf die Bakterientätigkeiten zurückzuführen. Ein zweiter Versuch bestätigte die Vermutung, dass es durch den Eintrag von Carbopol zu einer intensiven Verdichtung der oberflächennahen Bereiche gekommen war. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand nahm erheblich zu. Insgesamt war zu beobachten, dass die μ- Werte der zweiten Messung an dem frisch gesägten Material deutlich höher als bei dem ersten Versuch mit verkrustetem Steinmaterial lagen.

Die Anfärbung von Probenmaterial der drei Objekte verdeutlichte weiter die Position des Gipses im Steingefüge. Durch den Vergleich von Probenmaterial vor und nach der Behandlung ergab sich, dass keine generellen Aussagen zur Bakterienaktivität gemacht werden können. In einigen Proben wurde der Gipsanteil erheblich reduziert, während in anderen Bereichen der Endzustand mehr Schadsalz zeigte als der Vorzustand.

Deutlich wurde durch den Versuch aber auch die eingeschränkte Tiefenwirkung der Biokompresse: Die Bakterien erfassen und verwerten nur Salze in oberflächennahen Gesteinslagen. Der Versuch verdeutlichte vor allem die Inhomogenität der Krusten in Hinblick auf Dicke und Sulfatgehalt.

Abschließend wurde ein Sulfatnachweis zur quantitativen Bestimmung des Schadsalzes in den behandelten Objektbereichen durchgeführt. Dieser ergab für 90% der untersuchten

Proben eine Sulfatreduzierung. Die Ergebnisse lagen zwischen 3 und 100%. Die Salzverminderung scheint für beide Desulfovibrio- Stämme vergleichbar.
Ein gutes Ergebnis konnte auch mit einer Neutralkompresse mit unbeimpfter Pufferlösung erzielt werden. Die Ammoniumcarbonat- Kompressen zeigten eine Sulfatverminderung zwischen 10 und 40% und damit ein Ergebnis, das vergleichbar mit den Biokompressen ist.

Teil 4

1. Ergebnisse der durchgeführten mikrobiellen Salzverminderung

Gipskrusten auf Sandstein sind ein typisches Schadensbild, das die Atmungsaktivität und die optische Erscheinung des Natursteins nachhaltig beeinflusst. Mit klassischen Reinigungs- oder Salzverminderungsmethoden wie der Ammoniumcarbonat- Methode sind sie meist nicht vollständig zu entfernen. In der vorliegenden Diplomarbeit wurde die mikrobielle Salzverminderung auf Sandstein mit Gipskrusten durchgeführt und bewertet. Dabei sollten sulfatreduzierende Bakterien das Sulfat aus dem Stein entfernen.
Die Bakterien Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris und Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans wurden im Labor angezogen und in Massenkultur gebracht. Da die Bakterien nicht aus dem Vollmedium abgetrennt werden konnten, wurde die Nährlösung für die Applikation mit einem Phosphat- Puffer im Verhältnis 1:4 verdünnt. Für das Aufbringen der Bakterien auf die Steinoberflächen wurden in den Vorversuchen
1. das Andicken der Medium- Puffer- Mischung mit Carbopol sowie
2. das Tränken von zwei verschiedenen Foliensystemen mit der Suspension ausgewählt.
Die Applikation der Bakterienkompressen erfolgte im Labor sowie an zwei verschiedenen Objekten in situ. An zweien der drei behandelten Objekte wurde nach der Applikation eine leichte Aufhellung beobachtet. Die wissenschaftliche Auswertung der Salzverminderung erfolgte anhand zahlreicher Versuche im Labor.
Die an den behandelten Steinoberflächen durchgeführten Mirowskimessungen zeigten keine wesentlichen Veränderungen der Oberflächen durch die Behandlung mit Biokompressen. Versuche zum Wasserdampfdiffusionswiderstand an verkrustetem Steinmaterial dagegen ergaben eine Öffnung des Porenraumes. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand wurde durch die Sulfatreduktion etwa um die Hälfte gesenkt. Die mit Carbopol- Kompressen behandelten Oberflächen dagegen wiesen eine Verdichtung auf, die der Bakterientätigkeit entgegenwirkt.
Die Anfärbung von Probenmaterial auf Gips zeigte unterschiedliche Ergebnisse. Vor allem wurde deutlich, dass die Bakterien nur Gips im oberflächennahen Bereich verwerten können. Sulfat in tieferen Gesteinslagen wurde nicht erfasst.

Die Ermittlung des quantitativen Gipsgehaltes der Proben des Vor- und Endzustandes ergab eine nachweisbare Verminderung des Sulfatgehaltes in der Krustenzone bei 90% der Proben. Die Bakterien setzen nach mehr als drei Tagen kein Sulfat mehr um.

2. Gewonnene Erkenntnisse

Im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die sulfatreduzierenden Bakterien Sulfate aus Gipskrusten auf unterschiedlichen Sandsteinen umsetzen können. Die Verwendung von Bakterienkompressen kann zu einer Reduzierung des Sulfats im Stein von bis 100% führen, allerdings nur im oberflächennahen Bereich.

Die Applikation selbst stellt keine besonderen Anforderungen an den Restaurator. Die Kompressenfolien ermöglichen eine schnelle Durchführung der Salzverminderung, sind jedoch nur für ebene Oberflächen geeignet. Weiterhin sind die Folien schwer an rauen und sandenden Oberflächen zu befestigen.

Die Carbopol- Kompressen haften gut an verschiedenen, auch unebenen Steinoberflächen. Sie weisen aber andere Mängel wie die Verdichtung der Steinporen und möglicherweise auch eine Gesundheitsgefährdung auf. Aus restauratorischer Sicht wird von einer Verwendung von Carbopol auf offenporigen Oberflächen abgeraten.

Die optischen Resultate der Salzverminderung mit Biokompresse sind mit klassischen Kompressenmethoden vergleichbar. Eine erhebliche Aufhellung der behandelten Steinbereiche konnte nicht beobachtet werden.

Verschiedene Untersuchungen zu den strukturellen Veränderungen der Steinoberflächen führten zu unterschiedlichen Ergebnissen: die Wasseraufnahmemessungen nach Mirowski zeigen keine Veränderungen durch die Bakterien, während die Versuche zum Wasserdampfdiffusionswiderstand eine Öffnung des Porenraumes belegten. Auch die Photometermessungen bestätigten die erfolgreiche Sulfatreduzierung. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass Naturstein ein inhomogenes Material ist und daher Probenmaterial eines Steines erhebliche Unterschiede in der Zusammensetzung und damit auch der Salzbelastung aufweisen kann.

Die Anfärbungen von Gips im Gefüge nach Matteini waren nicht eindeutig auszuwerten. Der Versuch verdeutlichte die unterschiedliche Zusammensetzung der Krustenproben. Gips in tieferen Gesteinslagen wurde durch die Kompressenbehandlung nicht erfasst.

Die Bewertung der mikrobiellen Salzverminderung kann nur mit umfangreichem Probenmaterial erfolgen. Die Probennahme stellt aber einen irreversiblen Eingriff in die Steinsubstanz dar.

Unklar blieb, ob die Bakterien nach Abnahme der Kompressen absterben und von den Steinoberflächen abfallen. Möglich wäre auch, dass der Gips, der sich beim Aufbringen der Kompressen in der Flüssigkeit gelöst hat, nach der Probennahme im Zuge der Verdunstung des eingebrachten Wassers wieder auskristallisiert und die Bakterien überdeckt. Damit wären die Bakterien im Gefüge gebunden, und die Steuerbarkeit des Versuches wäre nicht mehr gegeben. Die behandelten Oberflächen müssen langfristig beobachtet und untersucht werden.

Rahmenbedingungen wie die Außentemperatur und relative Luftfeuchte sowie die Bestandteile des Steines müssen bei jedem Objekt näher untersucht werden und beim Einsatz der Kompresse bekannt sein, um mögliche Wechselwirkungen zu bestimmen. Die positiven Ergebnisse an einem Objekt können daher nicht ohne weiteres auf ein anderes projiziert werden.

Die Methode der mikrobiellen Salzverminderung ist sehr zeit- und kostenintensiv. Für die Vorbereitung des Versuches ist ein Labor mit umfassender Ausrüstung für die Anzucht von Anaerobiern notwendig. Bis die Bakterien für die Applikation am Objekt vorbereitet sind, benötigt man mindestens 4-8 Wochen Vorlauf.

Die benötigten Materialien von Bakterien über Materialien zur Herstellung des Mediums und der Pufferlösung bis zu den Kompressenfolien sind teuer in der Anschaffung und Entsorgung. Bei einer Applikation von Bakterien in größerem Umfang ist ein Gesundheitsrisiko mit einzukalkulieren, da das freiwerdende Gas Hydrogensulfid giftig ist[265].

Der geringe optische Reinigungserfolg stellt eine weitere Grenze für die Anwendung der mikrobiellen Salzverminderung dar: Die zeit- und damit auch kostenintensive Maßnahme lässt sich aus wirtschaftlicher Sicht schwer verkaufen.

3. Ausblick

Zahlreiche Faktoren der mikrobiellen Salzverminderung konnten in dem vorgegebenen Zeitrahmen nicht näher untersucht werden. Für eine Verbesserung der Methode und den Einsatz in größerem Umfang sollten die hier verwendeten Zeitrahmen und Untersuchungsmethoden weiterentwickelt und ggf. modifiziert werden, um den Erfolg zu optimieren.

Offen bleibt, inwieweit das regelmäßige Befeuchten der Kompressen (2 - 4mal täglich) notwendig erscheint. Dies muss durch Analogversuche ermittelt werden. Möglicherweise kann die Menge an benötigter Bakteriensuspension weiter herunterreduziert werden. Auch der Zeitrahmen der Applikation kann genauer untersucht und optimiert werden.

[265] s. Anhang, Sicherheitsdatenblatt nach TRGS 220.

Aus restauratorischer Sicht müssen vor allem die Nachwirkungen der mikrobiellen Kompressenbehandlung näher untersucht werden: unklar bleibt, wohin die Bakterien nach Abnahme der Kompressen von den Steinoberflächen verschwinden. Dieser Aspekt ist besonders wichtig in Hinblick auf die „Steuerbarkeit“ des Versuchs.

Die Kompressenfolien führten zu guten Reinigungsergebnissen an ebenen Oberflächen. Sie sind jedoch schwer zu fixieren und für profilierte Bereiche ungeeignet. Die Befestigung kann weiter verbessert werden.

Bei der Applikation mit Carbopol muss weiter untersucht werden, inwieweit Reste der Kompresse, die nicht von den Oberflächen entfernt werden konnten oder in das Gefüge eingedrungen sind, den Stein längerfristig verändern. Hierbei wäre es notwendig, natürlich verkrustetes Steinmaterial mit einer Bakterien- Carbopolkompresse zu versehen und anschließend einem Versuch zu Wasserdampfdiffusion zu unterziehen. Dies war aus Zeitgründen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Weiterhin könnten auch alternative Kompressenmaterialien verwendet werden.

Auch die farblichen Veränderungen durch den Einsatz der Kompressen müssen langfristig beobachtet werden. Die optische Aufhellung spielt dabei ebenso eine Rolle wie ein möglicher verstärkter Befall der gereinigten Oberflächen durch Mikroorganismen oder andere Verfärbungen.

Zu berücksichtigen sind hier die eingebrachten Komponenten der Kompresse: die verwendete Puffer- Medium- Bakteriensuspension zeigt eine schwarze Farbigkeit. In den Versuchen war eine Verfärbung nicht erkennbar, da die untersuchten Sandsteine intensiv schwarz gefärbte Krusten aufwiesen. Die Bakteriensuspension kann durch die enthaltenen Bestandteile möglicherweise Reaktionen im Steingefüge verursachen und zu Farbveränderungen führen. Unter Umständen kann durch die Zugabe von weiteren Reagenzien zu der Suspension eine Reaktion mit Gesteinskomponenten bzw. eine Verfärbung des Steines verhindert werden.

Anhang Übersicht

Literaturverzeichnis

Fotodokumentationen

Fotodokumentation I Gipswürfel
Fotodokumentation II Durchführung der mikrobiellen Entsalzung im Labor
Fotodokumentation III Durchführung der mikrobiellen Entsalzung an Schloss Ksiaz, Polen
Fotodokumentation IV Durchführung der mikrobiellen Entsalzung am Hildesheimer Dom

Tabellen

Tabelle 1 Überimpfung Kulturen
Tabelle 2 Überprüfung der Vitalität und Aktivität der Bakterien
Tabelle 3 Bewertung der Bakterienvitalität und –aktivität
Tabelle 4 Gipswürfel
Tabelle 5 Gipswürfelzugabe zu verschiedenen Nährlösungen
Tabelle 6 Lebensdauer der Bakterien in verschiedenen Nährlösungen
Tabelle 7 Tropfenmessung
Tabelle 8 Gewichtsvergleich verschiedene Kompressenmaterialien
Tabelle 9 Bezeichnung der Probeflächen bei der Applikation
Tabelle 10 Pufferbeimpfung
Tabelle 11 Mirowskimessung Labor
Tabelle 12 Mirowskimessung Dom
Tabelle 13 Wasserdampfdiffusion
Tabelle 14Wasserdampfdiffusion Carbopol
Tabelle 15 Photometermessungen

Datenblätter und Schriftverkehr

Abbildungsverzeichnis
Verwendete Materialien

DSMZ Merkblatt zur Herstellung des Mediums 63

Rezepturen des BIOBRUSH- Projektes für die Herstellung von Medium und Puffer für sulfatreduzierende Bakterien
kurze Beschreibung der Arbeit mit sulfatreduzierenden Bakterien, Email E. May, März 2005

Herstellung eines sauerstofffreien Mediums, Ziele und Schritte
Guidelines prepared for Cabri by DSMZ, CBS and BCCM, 17 May 1998

Laboratory based treatment of stone using sulphate reducing bacteria with Carbogel
per Mail von E. May, März 2005

Liste der Einteilung von Mikroorganismen in Risikogruppen

Produktinformation zu Baclight, Live / dead Baclight Bacterial viability kits

EG- Sicherheitsdatenblatt nach TRGS 220, Hydrogensulfid

DIN 52615 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen

Merck Informationsblatt zu verschiedenen Sulfatnachweisen
Messbereich, Einheit und Wellenlänge

Anhang Datenblätter und Schriftverkehr

Abbildungsverzeichnis

Verwendete Materialien

DSMZ Merkblatt zur Herstellung des Mediums 63

Rezepturen des BIOBRUSH- Projektes für die Herstellung von Medium und Puffer für sulfatreduzierende Bakterien

kurze Beschreibung der Arbeit mit sulfatreduzierenden Bakterien, Email E. May, März 2005

Herstellung eines sauerstofffreien Mediums, Ziele und Schritte
Guidelines prepared for Cabri by DSMZ, CBS and BCCM, 17 May 1998

Laboratory based treatment of stone using sulphate reducing bacteria with Carbogel
per Mail von E. May, März 2005

Liste der Einteilung von Mikroorganismen in Risikogruppen

Produktinformation zu Baclight, Live / dead Baclight Bacterial viability kits

EG- Sicherheitsdatenblatt nach TRGS 220, Hydrogensulfid

DIN 52615 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen

Merck Informationsblatt zu verschiedenen Sulfatnachweisen
Messbereich, Einheit und Wellenlänge

Literaturverzeichnis

Amoroso, G.G. und Fassina, V.
Stone decay and conservation
Materials Science Monographs, Vol.11
Elsevier Science Publishers B.V.
Amsterdam 1983

Arendt, C. und Seele, J.
Feuchte und Salze in Gebäuden
Ursachen Sanierung Vorbeugung
Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Leinfelden- Echterdingen 2000

Atlas, R.M., Chowdhury, A.N. und Lal Gauri, K.
Microbial calcification of gypsum roch and sulphated marble
S. 149-153 in:
Studies in conservation 33 (1988)

Auras, M., Siedel, H. und Weber, H.
Reinigung und Steinkonservierung
S. 684-716 in:
Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.)
Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege
Ebner Verlag Ulm 1997

Beijerinck, W.M.
Über spirillum desulfuricans als Ursache von Sulfatreduktion
S. 1-9. 49-59. 104-114 in:
Centralblatt Bakteriol. II Abt. 1, 1895

Bernal, J.L.P. und Lopez, M.A.B.
The effect of relative humidity and foreign matter on the reaction between sulphur dioxide and calcium carbonate
In:
Kwiatkowski, D. und Löfvendahl, R. (Hrsg.)
Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone
Vol.1, Icomos Schweden
Elanders Gotab, Stockholm 2004

Bläuer Böhm, C.
Praktische Hinweise zur Vorgehensweise bei der Untersuchung und Beurteilung von salzbelasteten Baudenkmalen
S. 39-52 in:
Salzschäden an Wandmalereien
Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 78, München 1996

Blaschke, R.
Typische Verwitterungsprofile von Gesteinsproben im mikroskopischen Bild
S. 25-32 in:
Bautenschutz Bausanierung (Sonderheft) 1988

Bock, E., Diercks, M., Krause-Kupsch, Th., Lin, L., Meincke, M., Sameluck, F., Sand, W. und Spieck, E.
Belastung von Natursteinen mit salpetersäurebildenden Bakterien- eine Bewertung am Beispiel von ausgewählten Bauwerken
S. 47-57 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1989

Bock, E. und Fahrig, N.
Mikroorganismen in Steinen historischer Bauten- eine Datenanalyse
S.179-196 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1991

Bock, E. et. al.
Neue Ergebnisse zur Belastung von Natursteinen mit salpetersäurebildenden Bakterien
S. 67-82 in:
Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1992

Bock, E., Josza, P., Kussmaul, M., Mansch, R., Sand, W., Schröder, S., Spieck, E., Vollmer, M. und Willimzig, M.
Fortschritte bei der Beurteilung mikrobiell beeinflusster Gesteinszerstörung
S. 33-48 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1992

Bock, E., Josza, P., Mansch, R., Sand, W., Spieck, E., Strüven, R., Willimzig, M.
Wege zur Beurteilung mikrobiell beinflusster Schäden in Natursteinen, Mörtel und zementgebundenen Baustoffen
S. 27- 42 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1993

Braams, J., Becker, T.W., Krumbein, W.E., Lau, R., Rudolph, C., Vogt, C., Wolf, B., Wollenzien, U. und Warscheid, Th.
Biodeteriorationsprozesse und ihre Bedeutung für die Erstellung von Sanierungskonzepten an Naturstein-, Ziegel- und Fachwerkmonumenten
S. 43-58 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1993

Burnstock, A. und White, R.
The effects of selected solvents and soaps on a simulated canvas painting
S. 111-118 in:
Cleaning, retouching and Coatings, IIC London 1990

Cammenga, H.K. und Welzel, M.M.
Grundlagen der Chemie
S. 257-282 in:
Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.)
Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege
Ebner Verlag Ulm 1997

Carstens, M.
Bestimmung von SO_2- Depositionsgeschwindigkeiten auf mit Schutzstoffen imprägnierten Gesteinsproben nach unterschiedlichen Langzeitbelastungen
Dissertation im Fachbereich Chemie
Hamburg 2003

Charola, A.E.
Salt Deterioration – open questions
S.19-24 in:
Leitner, H., Laue, S., Siedel, H. (Hrsg.)
Mauersalze und Architekturoberflächen
Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 2002
Klingenberg Buchkunst Leipzig 2003

Cypionka, H.
Grundlagen der Mikrobiologie
Springer Verlag Berlin 2002

D´ham, G.
Methoden der Kennwertermittlung im Tiefenprofil zur Planung und Überprüfung von Konservierungsmaßnahmen
Untersuchung ausgewählter Messverfahren am Beispiel des Hildesheimer Rhätsiltsteines vom Kreuzgang der St. Michaeliskirche
Facharbeit zum Diplom an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 2003

Dilling, W. und Cypionka, H.
Aerobic respiration in sulphate- reducing bacteria
S. 123-128 in:
Arch. Microbiol. 71, 1990

Ehling, A.
Die oberkretazischen Bausandsteine Schlesiens
Petrographie, Geochemie, Gesteinstechnische Eigenschaften, Verwitterung und Verwendung sowie Charakterisierung ihres Kathodolumineszenz- Verhaltens
Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften und Geographie
Hannover 1999

Fitzner, B. und Kownatzki, R.
Bauwerkskartierung: Schadensaufnahme an Naturwerksteinen
S. 25-40 in:
Der freiberufliche Restaurator, Heft 4, 1990

Frost, B., Lunkwitz, R und Steger, W.E
Salzschäden an Sandsteinfassaden
S. 43-45 in:
Farbe und Raum 2, 1988

Füchtbauer, H.
Sedimente und Sedimentgesteine
Schweizerbart Stuttgart 1988

Gauri, K.Lal, Chowdhury, A.N., Kulshreshtha, N.P. und Punuru, A.R.
The sulfation of marble and the treatment of gypsum crusts
S. 201-206 in:
Studies in conservation 34 (1989)

Gervais, A., Gervais, K. und Lepper, J.
Naturwerksteinvarietäten im Kreuzgang, ihre Eigenschaften, Verwendung und geologische Herkunft
S. 149-152 in:
Segers- Glocke, C., Weyer, A. (Hrsg.)
Der Kreuzgang von St. Michael in Hildesheim – 1000 Jahre Kulturgeschichte in Stein
Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Bd. 20
Hameln 2000

Goodrich, B.F.
Specialty Chemicals:
Final Report on the safety Assessment of Carbomers 934, 910, 934p, 940, 941 and 962
Journal of the American College of Toxicology (JAGT), 1 (2) 1982

Grasegger, G.
Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmälern
S. 434-489 in:
Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.)
Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege
Ebner Verlag Ulm 1997

Grell, S.
Restauratorisches Analysesystem für die Kontrolle von Sulfatentfernungen in der Steinrestaurierung untersucht an den Reinigungsmethoden mit Ammoniumcarbonat und Ionenaustauschharz
Diplomarbeit an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 1997

Grimm, W.D.
Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland
Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege 50, München 1984

Gruber, P. und Sternad, B.
The detection and identification of gypsum alteration products in stone by means of ultraviolet fluorescence microskopy
S. 161-167 in:
Studies in conservation 26 (1981)

Grunert, S.
Petrochemische Untersuchungen an Kreidesandsteinen aus der Elbtalzone
S. 28-118 in:
Freiberger Forschungshefte A 583,1984

Haake, S.E.
Carbopolgele auf Steinoberflächen
Facharbeit zum Diplom an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 2001

Haller, U.
Studien zur Herstellung und Anwendung von Lösungsmittel- Gelen, -Pasten und –Kompressen in der Restaurierung
Diplomarbeit Stuttgart 1994

Hardy, J.A. und Hamilton, W.A.
The oxygen tolerance of sulfate- reducing bacteria siolated from North Sea waters
S. 259-262 in:
Curr Microbiol 6, 1981

Hatchikian, C.E., Legall, J. und Bell, G.R.
Significance of superoxide dismutase and catalase activity in the strict anaerobes, sulphate. Reducing bacteria
S. 159-172 in:
Michelson A.M., Mc Cord, J.M., Fridovich, I. (ebs.)
Superoxide and superoxide dismutase
Academic press, New York and London, 1977

Heiling, K.
Der Einfluss ausgewählter Reinigungsmaterialien auf den mikrobiellen Befall und die physikalischen Eigenschaften des mineralischen Untergrundes
Diplomarbeit an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 2003

Heselmeyer, K.
Untersuchungen zur Gipsumwandlung in Gesteinskrusten durch den Einfluss sulfatreduzierender Bakterien
Diplomarbeit im Studiengang Diplom- Biologie
Universität Oldenburg 1990

Hewitt, J. und Morris JG.
Superoxide dismutase in some obligately anaerobis bacteria
S. 315-318 in:
FEBS Lett 50, 1975

Hoke, E.
Investigations of weathering crusts on Salzburg stone monuments
S. 118-126 in:
Studies in conservation 23 (1978)

Kalff, J.
Das nördliche Paradies im Dom zu Hildesheim
Restauratorische Befundsicherung mit neuen Daten zur Kunstgeschichte und den historischen Oberflächen
Facharbeit zum Diplom an der HAWK, FH HHG
unveröffentlicht, Hildesheim 2005

Kassem, A.
Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie
Aktivitäten Biomasse Differenzierung
Landsberg / Lech 1991

Keith, S.M. und Herbert, R.A.
Dissimilatory nitrate reduction by a strain of Desulfovibrio desulfuricans
1983 FEMS Microbiol Lett 18, S. 55-59

Klemm, W.
Zur Herkunft von Sulfat an Bauwerken –
Das Schwefelisotopenverhältnis als Indikator
S. 46–49 in:
Siegesmund, S., Auras, M., Snethlage, R.
Stein Zerfall und Konservierung
Edition Leipzig 2005

Knöfel D. und Schubert P. (Hrsg.)
Handbuch Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege
Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT- Verbundforschung zur Denkmalpflege
Berlin 1993

Kraus, K. und Auras, M.
Ausgewählte Ergebnisse des BMFT- Forschungsprogramms
S. 718-740 in:
Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.)
Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege
Ebner Verlag Ulm 1997

Krekeler, D.
Das Verhalten sulfatreduzierender Bakterien zu Sauerstoff
Sulfatreduzierende Bakterien aus Sauerstoffgradienten (Cyanobakterienmatten und Termitendärmen) und ihr Verhalten zu Sauerstoff sowie die Reihenfolge katalysierter Reaktionen bei Desulfovibrio desulfuricans CSN
Dissertation im Fachbereich Biologie
Universität Oldenburg 1997

Krekeler, D. und Cypionka, H.
The preferred electron acceptor of Desulfovibrio desulfuricans CSN
S. 271-278 in:
FEMS Microbiol. Ecol. 17, 1995

Krumbein, W.E., Bode- Warscheid, K., Braams, J., Chamier, B., Gehrmann, C.K., Grote, G., Groß, M., Lau, R., Schostak, V., Petersen, K., Warscheid, Th., Gründgen, E., Pilzen, M. und Schulte, A.
Mikrobiologie an Natursteinmonumenten – Schadenspotential, Wechselwirkungen mit Behandlungen
S. 39-66 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1990

Krumbein, W.E.
Untersuchungen zu mikrobiell verursachten physikalischen und chemischen Schäden an Pilotobjekten
S. 169-178 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1991

Krumbein, W.E.
Zum Begriff Patina, seiner Beziehung zu Krusten, Verfärbungen und deren Auswirkungen auf den Zustand von Monumenten
S. 215-229 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1991

Laiz, L., Recio, D., Hermosin, B. und Saiz-Jimenez, C.
Microbial communities in salt efflorescences
S. 77-88 in:
In: Ciferri, O., Tiano, P. und Mastromei, G.
Of microbes and art
The role of microbial communities in the degradation and protection of Cultural heritage, New York, 2000

Leitner, H.
Die Rolle des Restaurators im interdisziplinären Feld der Erhaltung von salzbelasteten Wandmalereien
S. 190- 200 in:
Leitner, H., Laue, S. und Siedel, H. (Hrsg.)
Mauersalze und Architekturoberflächen
Tagungsbeiträge Hochschule für Bildende Künste Dresden
1.-3. Februar 2002
Dresden 2003

Leupold, C.
Rosafarbene Bakterien auf Wandflächen
Untersuchungen zu den Wachstumsbedingungen
Diplomarbeit an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 2006

Machill, S., Althaus K. und Steger, W.E.
Zur Verwitterung der Kulturbauten aus Elbsandstein
S. 267- 350 in:
Bautenschutz und Bausanierung 1998
Madigan, M.T., Martinko, J.M., Parker, J.
Brock Mikrobiologie
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin, 2000

Mainusch, N.
Erstellung einer Materialsammlung zur qualitativen Bestimmung bauschädlicher Salze für Fachleute der Restaurierung
Diplomarbeit an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 2001

Matteini, M.
Mineralische Festigungsmittel zur Konservierung von Objekten aus porösem Material aus dem Bereich der Kunst und Archäologie
S. 173-184 in:
Leitner, H., Laue, S., Siedel, H. (Hrsg.)
Mauersalze und Architekturoberflächen
Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 2002
Klingenberg Buchkunst Leipzig 2003

May, E., Sorlini, C., Krage,L. Vgenopoulos, A. und Mello, E.
Databases for stone conservation by bioremediation arising from a european collaboration: the BIOBRUSH- project
S. 753-760 in:
Kwiatkowski, D. und Löfvendahl, R. (Hrsg.)
Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone Vol.1, Icomos Schweden
Elanders Gotab, Stockholm 2004

Mc Cready, R.G.L., Gould, W.D. und Cook, F.D.
Respiratory nitrate reduction by Desulfovibrio sp.
S. 182-185 in:
Arch Microbiol 135, 1983

Meyer, H.
S. 30-38 in:
Bausubstanz 1987, Nr. 8

Mirwald, P.W.
Physikalische Eigenschaften der Gesteine
S. 284-308 in:
Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.)
Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege
Ebner Verlag Ulm 1997

Mitchell, J.G., Jones, J.G. und Cole, J.A.
Distribution and regulation of nitrate and nitrite reduction by desulfovibrio and Desulfotomaculum species
S. 35-40 in:
Arch Microbiol 144, 1986

Müller, F.
Historische Bau- und Dekorationsgesteine in Deutschland
S. 310-379 in:
Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.)
Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege
Ebner Verlag Ulm 1997

Müller, U.
Sandsteinverwitterung an historischen Bauwerken unter dem Einfluss von Schwefeldioxid und Feuchte
Dissertation an der Fakultät für Bio- und Geowissenschaften
Universität Karlsruhe 2000

Neisel, J.D.
Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Gefügemerkmale von ungeschützten und imprägnierten Sandsteinen nach Verwitterungsbeanspruchung
Dissertation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften
Universität Aachen 1995

Neumann, H.-H.
Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein
Dissertation am Institut für Anorganische und Angewandte Chemie
Universität Hamburg 1994

Nord, A.G. und Ericsson, T.
Chemical analysis of thin black layers on building stone
S. 25-35 in:
Studies in conservation 38 (1993)

Nowatzky, W.
Konzipierung und Aufbau eines Windkanals zur Depositionsmessung und Klimasimulation sowie Untersuchungen zur Deposition von Schwefeldioxid auf Gesteinsprüfkörpern und Surrogatflächen
Dissertation im Fachbereich Chemie
Universität Hamburg 1998

Parrini, P.L., Peruccia, G. und Pizzigoni, G.
Influence of climate and anthropogene pollution on stone decay
S. 792-800 in:
M.-J. Thiel (Hrsg.)
Conservation of stone and other materials
Proceedings of the international RILEM / UNESCO Congress
Volume II preventions and treatments,
Paris 1993

Petersen, K. und Krumbein, W.E.
Mikroorganismen beschleunigen den Zerfall mittelalterlicher Wandgemälde in der Krummhörn am Beispiel der Wandmalereien in der ev.- ref. Kirche in Eilsum
S. 57-70 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1989

Petersen, K. und Krumbein, W.E.
Untersuchungen mikrobieller Schädigung von Wandmalereien
S. 49-64 in:
Jahresberichte Steinzerfall- Steinkonservierung,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1992

Ranalli, G., Matteini, M.,Tosini, I., Zanardini, E. und Sorlini. C.
Bioremediation of cultural heritage: removal of sulphates, nitrates and organic substances
S. 231-244 in:
Ciferri, O., Tiano, P. und Mastromei, G.
Of microbes and art
The role of microbial communities in the degradation and protection of Cultural heritage,
New York, 2000

Rau, P.
S. 54-58 in:
Der freiberufliche Restaurator, Heft 2,1987

Riedel, J.
Die Passionsfresken an der ehem. Schatzkammer des Stephansdoms in Wien
Möglichkeiten der Gipsbehandlung und der nachhaltigen Konservierung
Diplomarbeit an der HAWK FH HHG,
unveröffentlicht, Hildesheim 2000

Roesch, H. und Schwarz, H.J.
Damage to frescoes caused by sulphate-bearing salts: where does the sulfhur come from?
S. 224-230 in:
Studies in conservation 38 (1993)

Rossi- Manaresi, R. und Tucci, A.
Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallization in various types of stone
S. 53-58 in:
Studies in conservation 36 (1991)

Sass, H.
Vorkommen und Aktivität sulfatreduzierender Bakterien in der Oxykline limnischer Sedimente
Dissertation im Fachbereich Biologie
Universität Oldenburg 1997

Scheer, M.
Voruntersuchungen zum Einsatz von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zur Reduzierung von Gipskrusten auf Sandsteinoberflächen
Facharbeit zum Diplom an der HAWK FH HHG
unveröffentlicht, Hildesheim 2005

Schlegel, H.G. (unter Mitarbeit von K. Schmidt)
Allgemeine Mikrobiologie
6. Auflage, Thieme Verlag Stuttgart New York 1985

Schuh, H.
Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen
Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften
Münchener Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B
Allgemeine und Angewandte Geologie
München 1987

Schulz, A.
Gipsplastiken, Geschichte- Materialkunde- Reinigung von ungefassten Gipsoberflächen
Diplomarbeit am Institut für Technologie der Malerei,
Staatliche Akademie der Bildenden Künste
unveröffentlicht, Stuttgart, 1992

Schwarz, T.W. und Levy, G.
A report on the oxidative Degradation of Neutralized Carbopol
S. 442-443 in:
Journal of the American Pharmaceutical Association 47, 1958

Schwarz, U.
Bestandsaufnahme der Naturwerksteine und ihres Verwitterungszustandes in der Innenstadt Münchens
Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften
Universität München 1986

Seitz, H.J. und Cypionka, H.
Chemolithotrophic growth of Desulfovibrio desulfuricans with hydrogen coupled to ammonification of nitrate or nitrite
S. 63-67 in:
Arch Microbiol 146, 1986

Skoulikidis, T.N. und Beloyannis, N.
Inversion of marble sulfation- reconversion of gypsum films into calcite on the surfaces of monuments and statues
S. 197-204 in:
Studies in conservation 29 (1984)

Strubendorff, U.
Gesteinszerfall an Denkmalen in Niedersachsen- Ein Sofortprogramm des Instituts für Denkmalpflege zur Schadensdokumentation
in:
Hans Herbert Möller (Hrsg.)
Restaurierung von Kulturdenkmalen
Beispiele aus der niedersächsischen Denkmalpflege
Hameln, 1989

Tucker, M.E.
Einführung in die Sedimentpetrologie
Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1985

Trüper, H.G.
Microorganisms and the sulphur cycle
S. 351-365 in:
Sulfur, its significance for chemistry, for the geo-, bio-, and cosmosphere and technology (Müller, A., Krebs, B. ebs.)
Studies in inorganic chemistry
Vol. 5, Elsevier, Amsterdam

Venzmer, H.
Biokompresse
Altbauinstandsetzung 9/10, Feuchte- und Altbausanierung – Sonderheft 2005
Verlag Bauwesen Berlin 2005

Verges-Berlin, V.
Desalination of porous building materials: a review
S.121-137 in:
Leitner, H., Laue, S., Siedel, H. (Hrsg.)
Mauersalze und Architekturoberflächen
Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 2002
Klingenberg Buchkunst Leipzig 2003

Walch- von Miller, K.
Lösemittelgele und Seifen zur Trennung von Überzügen
Fallstudien und Erfahrungen aus der restauratorischen Praxis
1.Auflage, Verlag Anton Siegl München 2003

Wartenberg, A.
Einführung in die Biotechnologie
Gustav Fischer Verlag Stuttgart 1989

Weber, H. und 16 Mitautoren
Fassadenschutz und Bausanierung
Der Leitfaden für die Sanierung, Konservierung und Restaurierung von Gebäuden
5. Auflage Expert Verlag Renningen- Malmsheim 1994

Weiss- Quasdorf, M.
Laboruntersuchungen zur Kompressenauswahl
S. 37-56 in:
Venzmer, H. (Hrsg.)
Biokompresse - Altbauinstandsetzung 9/10, Feuchte- und Altbausanierung, Sonderheft 2005
Verlag Bauwesen Berlin 2005

Wenk, A.
Rastersystem zur Befestigung der Biokompresse auf Wandoberflächen
S. 151-161 in:
Venzmer, H. (Hrsg.)
Biokompresse
Altbauinstandsetzung 9/10, Feuchte- und Altbausanierung – Sonderheft 2005
Verlag Bauwesen Berlin 2005

Widdel, F.
Microbiology and ecology of sulfate- and sulfur- reducing bacteria
S. 469-585 in:
Biology of anaerobic microorganisms (Zehnder AJB, ed.),
John Wiley and Sons, New York 1988

Wieringa, E.B.A.
Diversity of sulfate- reducing bacteria along a vertical oxygen gradient in sediment of Schiermonnikoog
Dissertation im Fachbereich Biologie
Universität Oldenburg 2000

Willimzig, M.
Einfluss von Mikroorganismen auf bauschädliche Salze
S. 79- 82 in:
Leitner, H., Laue, S., Siedel, H. (Hrsg.)
Mauersalze und Architekturoberflächen
Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 2002
Klingenberg Buchkunst Leipzig 2003

Windsheimer, B., Snethlage, R., Wihr, R.
Die Entsalzung von Steindenkmälern im Freien
Forschungsbericht Nr. 4/ 1991
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor

Zehnder, K.
Beobachtung von Salzverwitterungsprozessen
S. 13-18 in:
Leitner, H., Laue, S., Siedel, H. (Hrsg.)
Mauersalze und Architekturoberflächen
Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 2002
Klingenberg Buchkunst Leipzig 2003

Zehnder, K. und Arnold, A.
Stone damage due to formate salts
S. 32-34 in:
Studies in conservation 29 (1984)

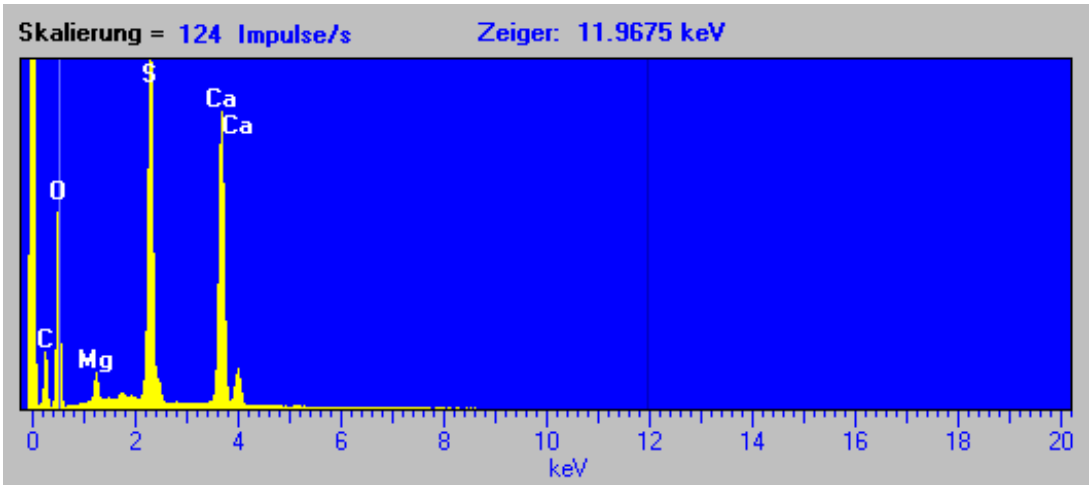
Anhang Fotodokumentationen

Fotodokumentation I

Verwertung von Gipswürfeln durch Bakterien

Für die Untersuchung zur Verwertung von Gips durch die sulfatreduzierenden Bakterien wurden Gipswürfel aus einem reinen Anhydrit- Stein verwendet. Es sollte untersucht werden, ob die Bakterien die Steinoberflächen überhaupt angreifen und Gips verwerten. Weiterhin galt es festzustellen, inwieweit Bakterien in Vollmedium einen stärkeren oder schwächeren Angriff auf die Oberflächen zeigen als mit Puffer verdünnte Bakteriensuspension.

Bei dem Steinmaterial handelt es sich um ein sehr dichtes hartes Gestein, das hellweiß erscheint und durch eine dunkelgraue Bänderung gekennzeichnet ist. Die Untersuchung des Gesteins im EDX ergab neben Calcium, Schwefel und Oxiden auch einen Magnesiumanteil, auf den vermutlich die dunkle Farbgebung zurückzuführen ist.



Ergebnis der EDX- Untersuchungen des Gipswürfelmaterials

Die in der Fotodokumentation dargestellten Gipswürfel wurden nass gesägt und anschließend bis zur Gewichtskonstanz im Exsikkator getrocknet. Die untersuchten Flächen wiesen im Mittel eine Kantenlänge von etwa 0,7 x 0,7 x 0,2 cm auf. Eine der Oberflächen wurde mit Schleifpapier poliert, damit mögliche Veränderungen deutlicher in Erscheinung treten. Diese Seitenflächen sind in der Fotodokumentation dargestellt.

Die Würfel wurden nummeriert und wie folgt behandelt:

Gips-Nr.	Lösung	Kultur	Versuchsdauer	Anfangs-gewicht	End-gewicht	Differenz	Gewichtsverlust in M%
1	reines Medium	D. desulfuricans	14 Tage	1,2174	1,1783	0,0391	3,21
2	reines Medium	D. vulgaris	14 Tage	1,3970	1,3661	0,0309	2,21
3	reines Medium	D. desulfuricans	14 Tage	1,1949	1,0255	0,1694	14,18
4	reines Medium	D. vulgaris	14 Tage	1,2713	1,1355	0,1358	10,68
5	3 ml P, 1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	0,7971	0,7117	0,0854	10,71
6	3 ml P, 1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	0,7078	0,6093	0,0985	13,92
7	5 ml P,1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	1,6579	1,6315	0,0264	1,59
8	5 ml P,1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	2,0905	2,0618	0,0287	1,37
9	6 ml P, 1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	0,9188	0,8493	0,0695	7,56
10	6 ml P, 1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	0,8946	0,8493	0,0453	5,06
11	reiner Puffer	D. desulfuricans	14 Tage	0,8163	0,7075	0,1088	13,33
12	reiner Puffer	D. vulgaris	14 Tage	0,8693	0,7757	0,0936	10,77
13	reiner Puffer	D. desulfuricans	14 Tage	1,7208	1,7097	0,0111	0,65
14	reiner Puffer	D. vulgaris	14 Tage	1,7991	1,7890	0,0101	0,56
15	aqua dest.	./.	14 Tage	1,5398	1,5428	-0,0030	-0,19
16	reines Medium	./.	14 Tage	0,7271	0,7114	0,0157	2,16
17	4 ml P, 1 ml M	./.	14 Tage	0,7532	0,7416	0,0116	1,54
18	unbeimpfer P	./.	14 Tage	1,0710	1,0706	0,0004	0,04

Übersicht der Behandlung der Gipswürfel mit Gewichtsveränderungen

Die Aktivität der Bakterien erstreckt sich auf alle Seiten der Gipswürfel. Partiell kam es in einzelnen Partien zu stärkeren Ablösungen. Die Betrachtung der Oberflächen ist im Zusammenhang mit den Gewichtsverlusten zu betrachten.

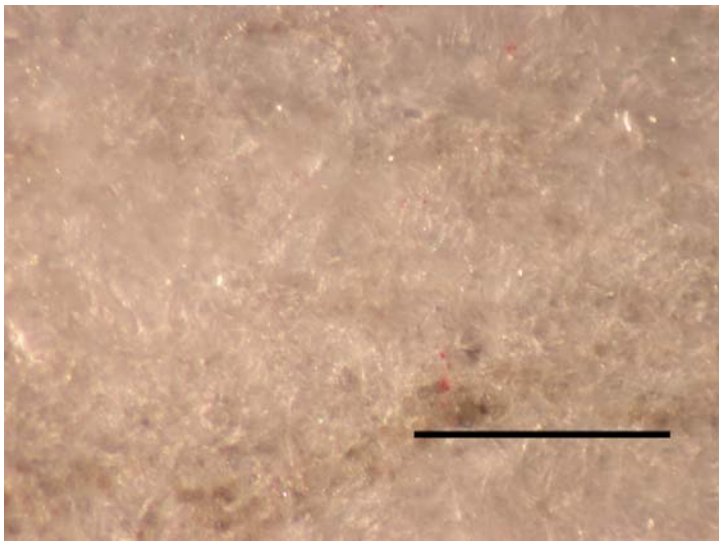
Der Fotodokumentation wurde eine Aufnahme eines unbehandelten Anhydrit- Steines vorangestellt. Sie verdeutlicht die Veränderungen, die die übrigen Gipswürfel durch die Lagerung in der Bakterienlösung erfuhren.

Die intensivsten Veränderungen an den Oberflächen zeigen die Würfel 3, 4, 5, 6, 11 und 12. Die Oberfläche dieser Gipswürfel ist durch die Bakterienaktivität vollständig verloren gegangen. Die Würfel zeigen ein sehr unruhiges und gebrochenes ausgeprägtes Relief. Der Angriff der Bakterien auf diesen Würfeln wird durch die hohen Gewichtsverluste bestätigt.

Die Würfel 2, 7 und 8 verdeutlichen, dass verschiedene Bereiche der Steinoberfläche schneller durch die Bakterien angegriffen werden, während andere Partien sich weitgehend unverändert präsentieren. Dabei zeigt sich, dass aber nicht unbedingt die schwarze Bänderung, die hauptsächlich Magnesiumoxid enthält, stehen bleibt, sondern härtere Schichten des Anhydrits. Bei Würfel 2 wird die Tätigkeit der Bakterien zusätzlich durch den hohen Gewichtsverlust deutlich.

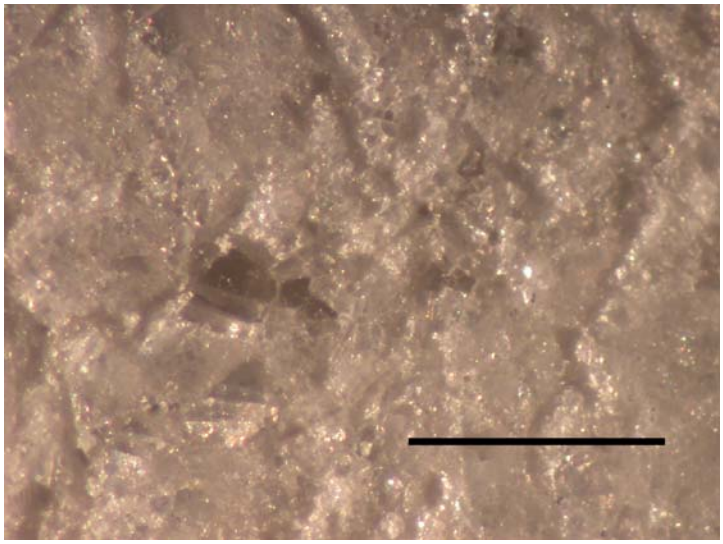
Die Oberflächen der Würfel 10 und 12 präsentieren sich dagegen weitgehend unverändert. Dennoch konnte bei Würfel 10 ein Gewichtsverlust von 5,06% ermittelt werden. Auch die Würfel 16 und 17, die in reinem Medium bzw. in unbeimpfter Puffer- Medium- Mischung gelagert wurden, zeigten keine markanten optischen Veränderungen. Allerdings kam es auch hier zu einer leichten Gewichtabnahme.
Alle Oberflächen unterscheiden sich von der unbehandelten Oberfläche. Auch der in reinem aqua dest. gelagerte Gipswürfel 15 zeigt eine leicht veränderte Oberfläche, bei der die einzelnen, nadelförmigen Kristalle nicht mehr so deutlich in Erscheinung treten. Diese sind jedoch bei den in reinem Medium gelagerten Würfel 16 und dem in Puffer- Medium-Mischung gelagerten Würfel 17 nach wie vor erkennbar. Dort ist es aber, anders als bei der reinen Wasserlagerung, zu einem leichten Gewichtsverlust gekommen.
Alle Gipswürfel wurden nach Versuchsdurchführung unter Laborbedingungen gelagert und standen Folgeversuchen weiterhin zur Verfügung.
Alle Aufnahmen wurden bei 40facher Vergrößerung mit Digitalkamera erstellt und anschließend bearbeitet. Der Balken bezeichnet in allen Aufnahmen eine Länge von 1 mm.

Fotodokumentation



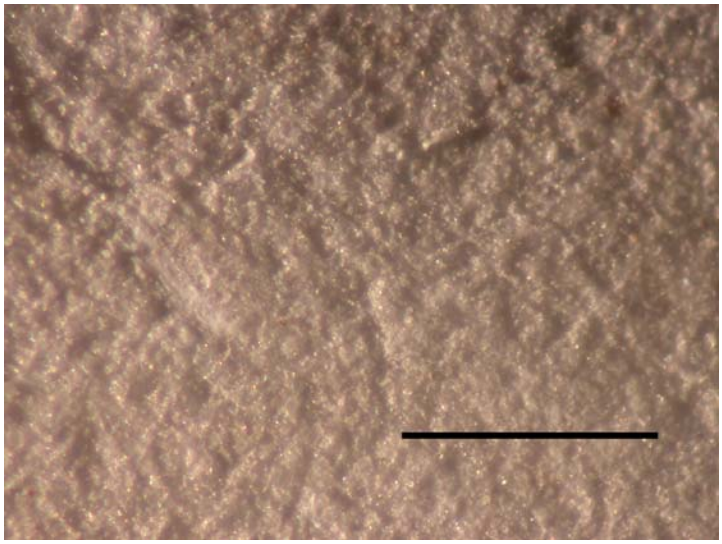
unbehandelte Gipswürfeloberfläche

Die Aufnahme zeigt die Oberfläche eines unbehandelten Gipswürfels nach dem Schleifen und Polieren. Deutlich sind die Kristalle in unregelmäßiger Schichtung erkennbar. Weiterhin sind auch unterschiedliche Farbbereiche wie eine dezente Bänderung im unteren Bildbereich zu sehen. Inwieweit diese verschiedenen Gesteinskomponenten unterschiedliche Löslichkeit und Verwertung durch die Bakterien erfahren, konnte nicht ermittelt werden. Die Oberfläche erscheint einheitlich und geschlossen, Reliefbildung ist nicht erkennbar.



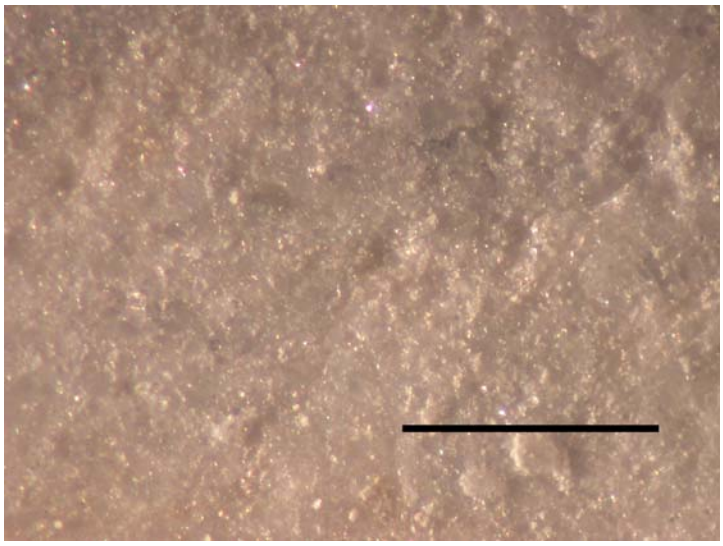
Gipswürfel 1

Die Aufnahme zeigt den Gipswürfel 1 nach der Behandlung. Die Gesteinsprobe wurde für 14 Tage in mit dem Bakterium Desulfovibrio desulfuricans beimpftem Medium gelagert und trocknete anschließend unter Laborbedingungen. Deutlich sind die Anlösung der Oberfläche und das verstärkte Oberflächenrelief zu erkennen. Der Gewichtsvergleich ergab einen Masseverlust von 3,21%.



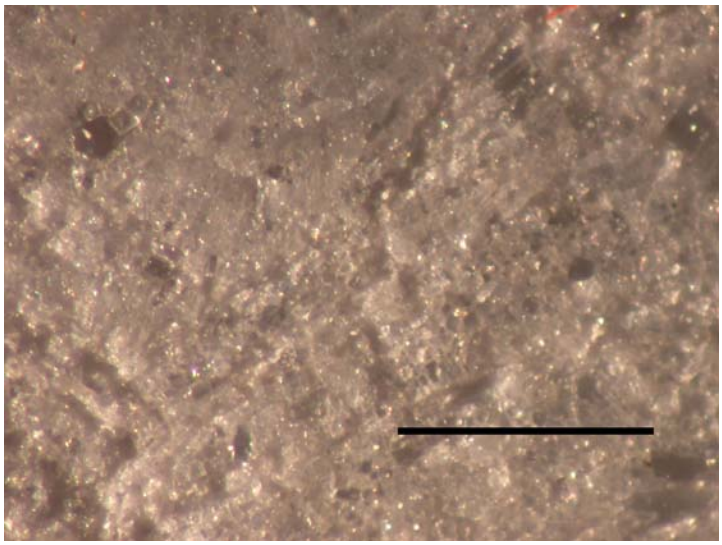
Gipswürfel 2

Die Gipswürfelprobe 2 wurde 14 Tage in mit D. desulfuricans- Bakterien beimpftem Medium gelagert und anschließend für 3 Wochen in reinen Puffer überführt. Nur die auf den Steinoberflächen angesiedelten Bakterien konnten demnach weiter Steinbestandteile verwerten. Das Oberflächenrelief ist deutlich ausgeprägter, von der plan geschliffenen Oberfläche ist nichts mehr erkennbar. Der Gewichtsverlust der Probe beträgt 14,18 M% und ist damit sehr hoch.



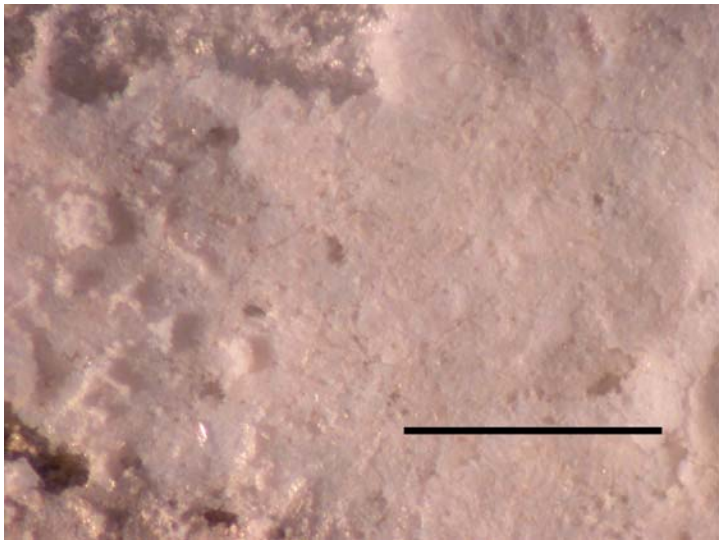
Gipswürfel 3

Auch der Gipswürfel 3 wurde zwei Wochen in mit dem Bakterium Desulfovibrio vulgaris beimpftem Medium gelagert und trocknete anschließend unter Laborbedingungen. Die Oberfläche erscheint im Vergleich wenig angegriffen, allerdings sind auch hier nur noch Reste der Originaloberfläche erkennbar. Der Gewichtsverlust wurde mit 10,68 M% ermittelt.



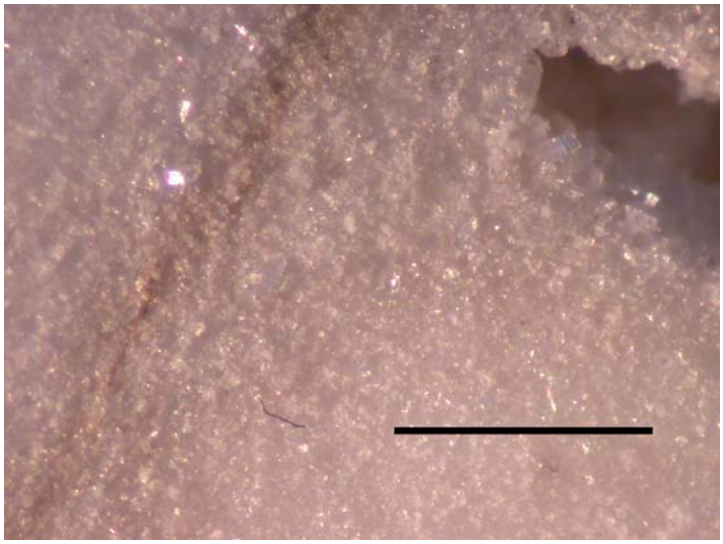
Gipswürfel 4

Die Aufnahme zeigt den Gipswürfel 4 nach der Behandlung. Die Gesteinsprobe wurde entsprechend dem Gipswürfel 3 behandelt, allerdings mit dem Bakterium Desulfovibrio vulgaris beimpft. Deutlich ist das verstärkte Oberflächenrelief zu erkennen, das deutlich intensiver als bei Gipswürfel 3 ausfällt. Der Gewichtsverlust von 2,21% dagegen ist deutlich geringer.



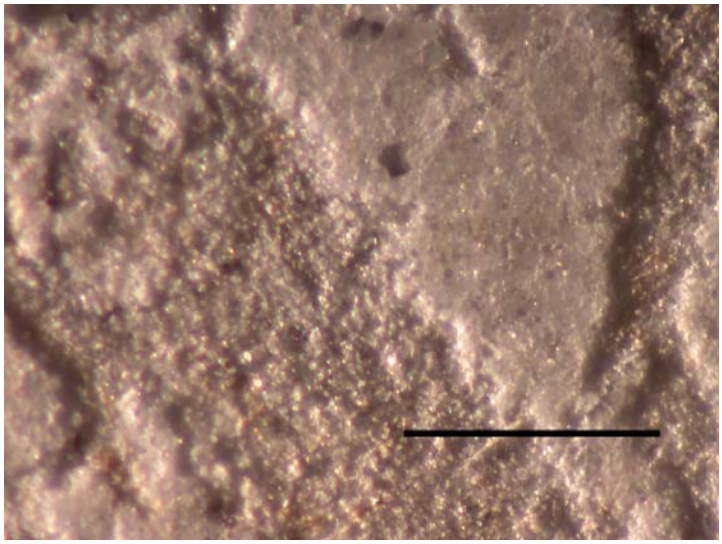
Gipswürfel 5

Gipswürfel 5 verblieb 14 Tage in einer Puffer- Medium- Mischung 3:1, bevor er unter Laborbedingungen austrocknete. Die Lösung war mit dem Bakterium Desulfovibrio desulfuricans beimpft. Die Oberfläche ist stark angelöst und in großen Bereichen nicht mehr erhalten. In den übrigen Partien liegt sie als dünne helle Schicht auf dem Stein auf. Offensichtlich ist es den Bakterien gelungen, auch unterhalb dieser Schicht zu agieren. Es kam durch die Behandlung zu einem Gewichtsverlust von 10,71M%.



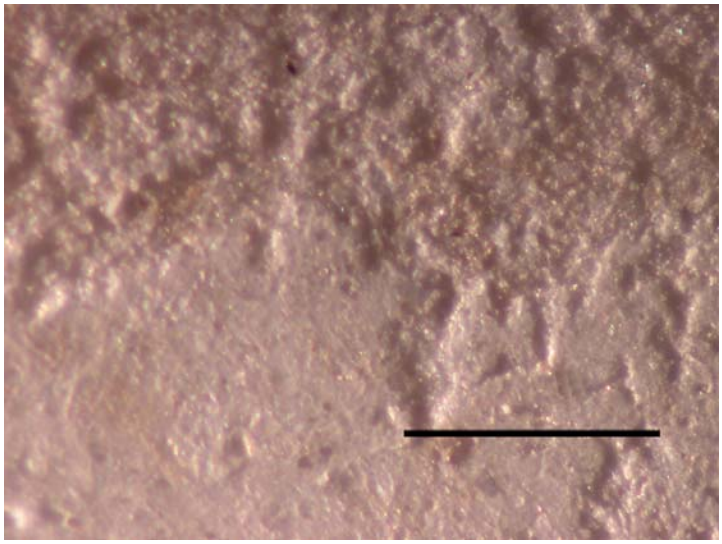
Gipswürfel 6

Gipswürfel 6 wurde analog zu Gipswürfel 5 behandelt, allerdings in mit dem Bakterium D. vulgaris beimpftem Medium gelagert. Die Oberfläche des Gipswürfels erscheint stark ausgewaschen, von den geschliffenen Bereichen sind nur partiell Reste geblieben. Es kam zu erheblichen Auswaschungen, wie rechts im Bild erkennbar. Der Gewichtsverlust beträgt 13,92 M% und ist damit sehr hoch.



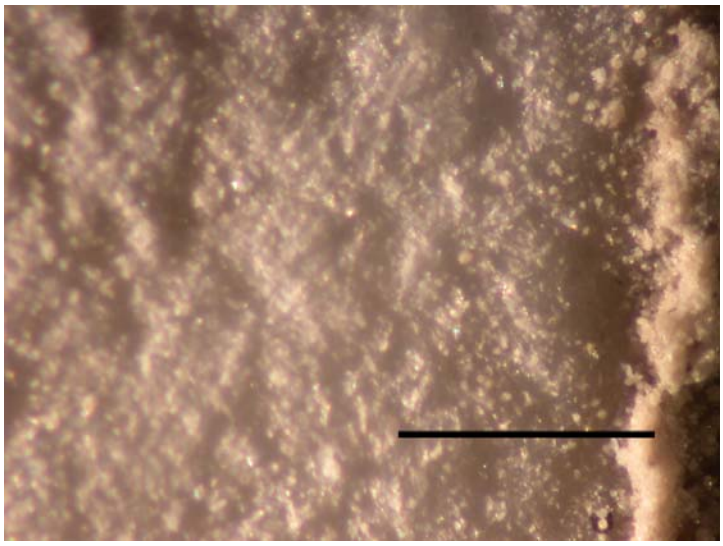
Gipswürfel 7

Auch der Gipswürfel 7 zeigt eine durch die Bakterien stark angegriffene Oberfläche mit großflächigem Substanzverlust. Die Probe lagerte 14 Tage in einer Puffer- Medium-Mischung, die mit Desulfovibrio desulfuricans beimpft worden war. Sie trocknete anschließend unter Laborbedingungen aus. Es kam zu einem Gewichtsverlust von 1,59 M%.



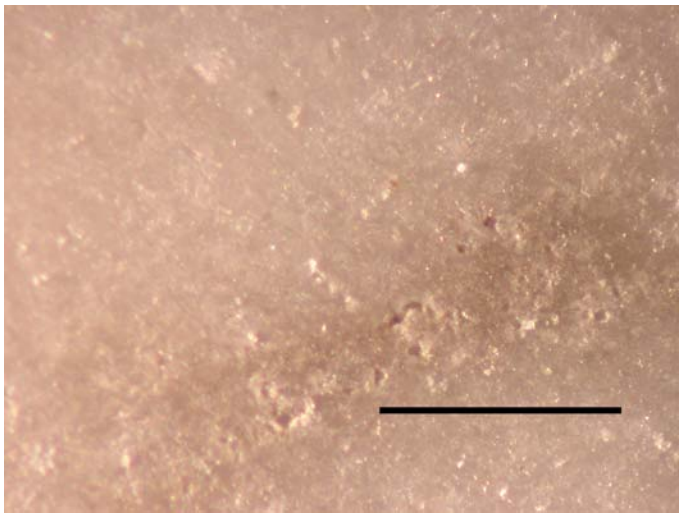
Gipswürfel 8

Auch der Gipswürfel 8 zeigt eine durch die Bakterien stark angegriffene Oberfläche mit partiellem Substanzverlust und einer Vertiefung des Reliefs. Die Probe lagerte 14 Tage in einer Puffer- Medium- Mischung, die mit Desulfovibrio vulgaris beimpft worden war und trocknete anschließend unter Laborbedingungen aus. Es kam zu einem Gewichtsverlust von 1,37 M%.



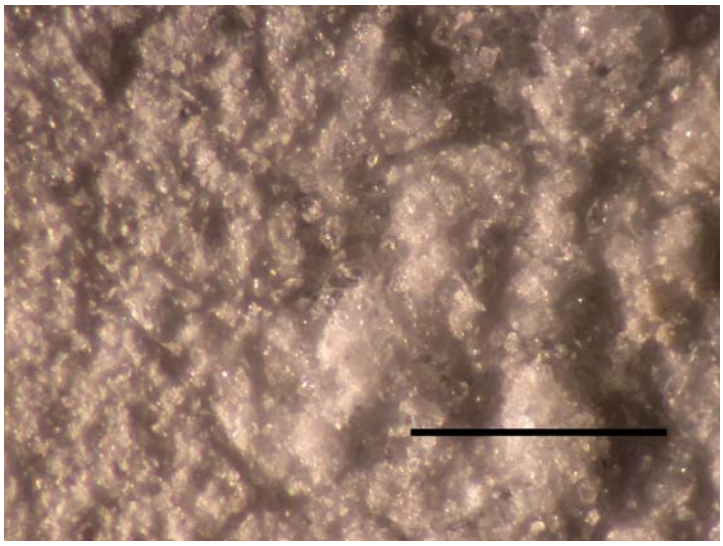
Gipswürfel 9

Gipswürfel 9 wurde zwei Wochen in einer Puffer- Medium- Mischung im Verhältnis 6:1 gelagert, die mit dem Bakterium Desulfovibrio desulfuricans beimpft war. Die Aufnahme zeigt eine deutlich stärkere Anlösung der Oberfläche und damit verbundene Substanzverluste. Originaloberfläche ist nicht mehr erkennbar. Der Gewichtsverlust wurde mit 7,56 M% ermittelt.



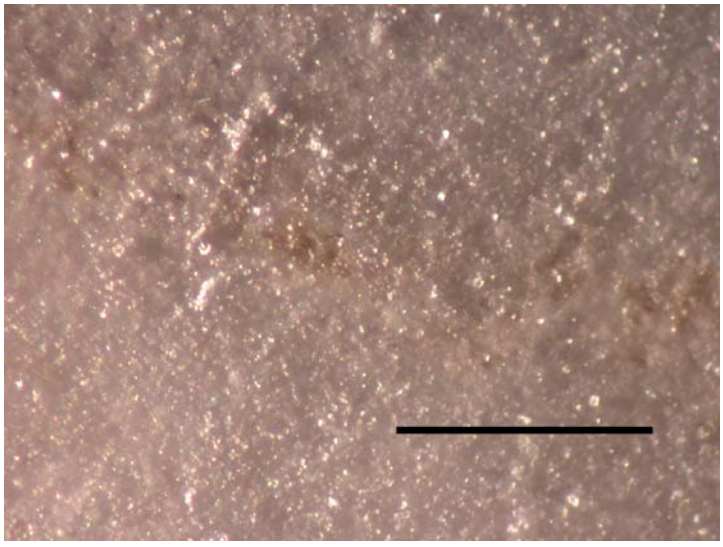
Gipswürfel 10

Die Aufnahme zeigt Gipswürfel 10, der analog zu Gipswürfel 8 behandelt wurde. Die Puffer-Medium- Mischung war hier mit Desulfovibrio vulgaris beimpft. Die Oberfläche erscheint nahezu unverändert, lediglich in kleinen Bereichen ist es zu einer Verstärkung des Reliefs gekommen. Dennoch konnte ein Gewichtsverlust von 5,06 M% ermittelt werden, der die Aktivität der Bakterien bestätigt.



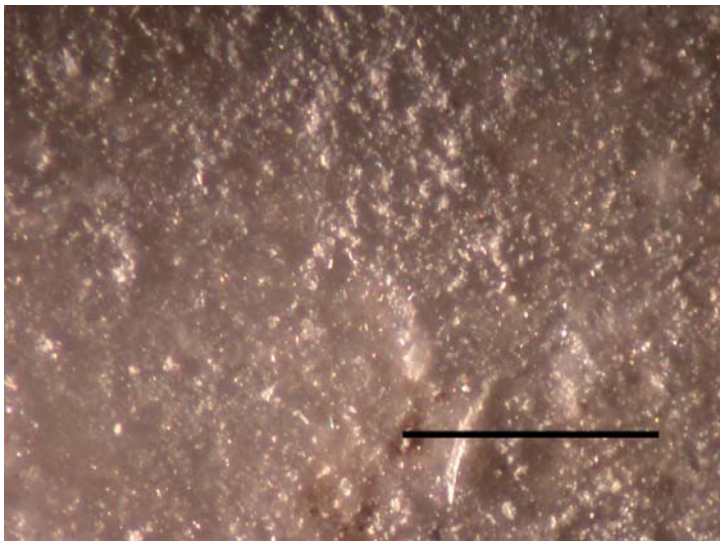
Gipswürfel 11

Gipswürfel 11 befand sich 14 Tage in mit Desulfovibrio desulfuricans beimpftem Puffer. Der Würfel präsentiert sich stark verändert mit einem ausgeprägten Relief. Von der Originaloberfläche ist nichts mehr erkennbar.
Der Gewichtsverlust durch die Behandlung beträgt 13,33 M%



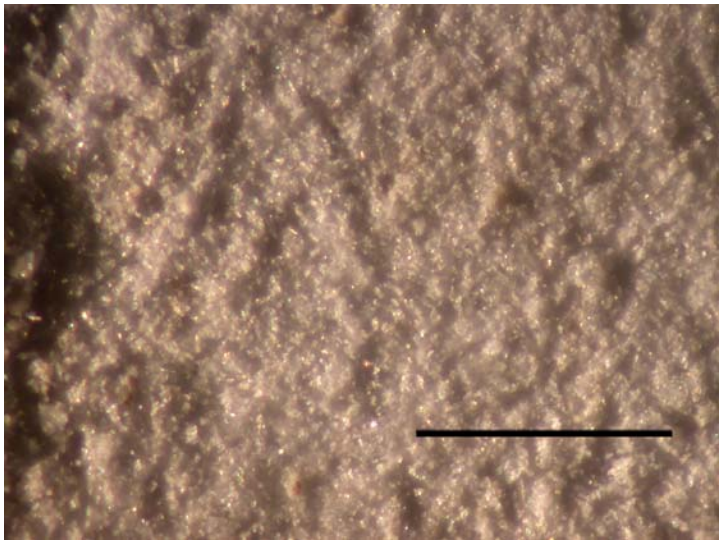
Gipswürfel 12

Der Gipswürfel 12 wurde für zwei Wochen in einer Pufferlösung, die mit zentrifugierten Bakterien der D. desulfuricans- Kultur beimpft war, gelagert und trocknete anschließend unter Laborbedingungen. Die Oberfläche erscheint leicht aufgeraut. Das Relief wurde durch die Bakterientätigkeit nicht wesentlich verstärkt. Bei der Probe kam es zu einem Gewichtsverlust von 10,77 M%.



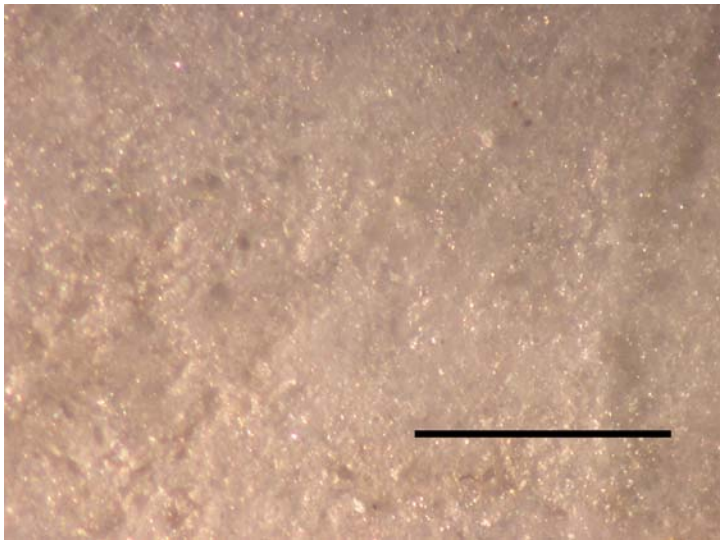
Gipswürfel 13

Der Gipswürfel 13 wurde wie Würfel 12 zwei Wochen in einer Pufferlösung, die mit zentrifugierten Bakterien der Desulfovibrio vulgaris- Kultur beimpft war, gelagert und trocknete anschließend unter Laborbedingungen. Die Oberfläche erscheint unregelmäßig mit aufliegenden Teilen des Gesteins und der Nährlösung. Das Relief wurde durch die Bakterientätigkeit nicht wesentlich verstärkt. Bei der Probe kam es zu einem Gewichtsverluste von 0,56 M%.



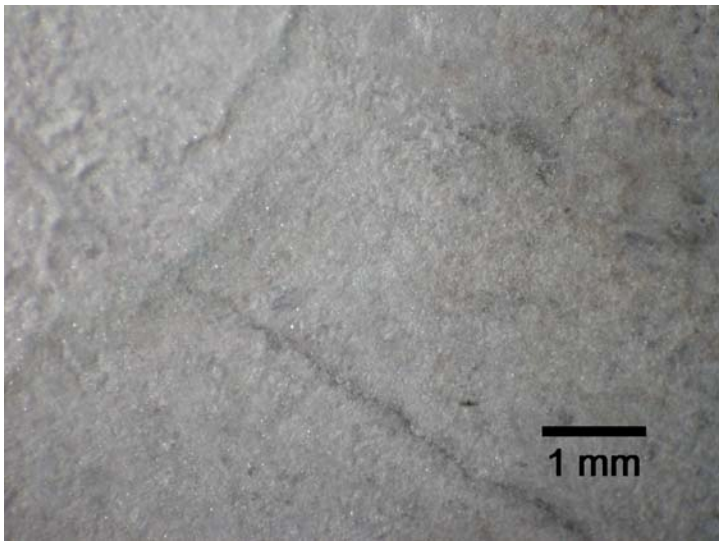
Gipswürfel 14

Auch Gipswürfel 14 zeigt nach der Behandlung eine deutlich veränderte Oberfläche. Der Würfel wurde in Puffer mit Desulfovibrio vulgaris- Bakterien für 14 Tage gelagert. Aufgrund des geringen Nährstoffgehalts in der Lösung wurden die Steinoberflächen von den Bakterien als Substrat genutzt. Dies wird durch den starken Gewichtsverlust des Würfels von 10,77% bestätigt.



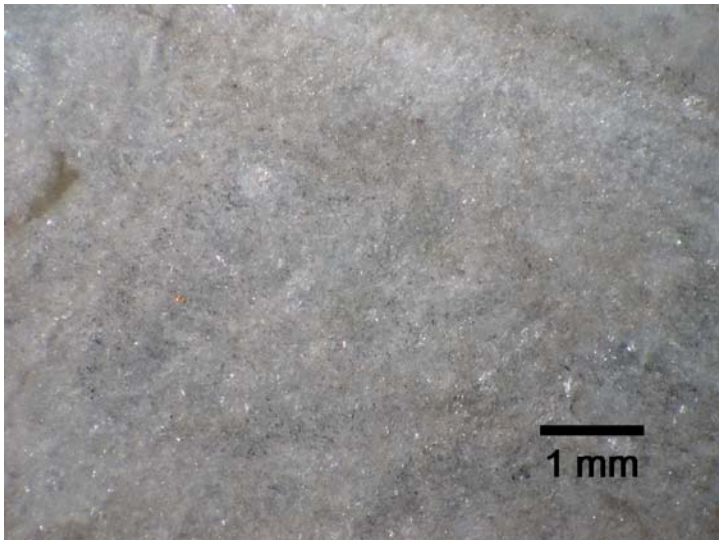
Gipswürfel 15

Gipswürfel 15 wurde für zwei Wochen in reinem unbeimpftem aqua dest. gelagert. Die Oberfläche erscheint im Vergleich zu den unbehandelten Würfeln nahezu unverändert. Ein Gewichtsverlust konnte nicht ermittelt werden, der Würfel nahm sogar minimal an Gewicht zu (0,19 M%). Dies ist auf die Einlagerung von Wasser in das Gefüge zurückzuführen. Der Würfel bestätigt, dass die Veränderung der Steinoberflächen ausschließlich auf Bakterienaktivität zurückzuführen ist.



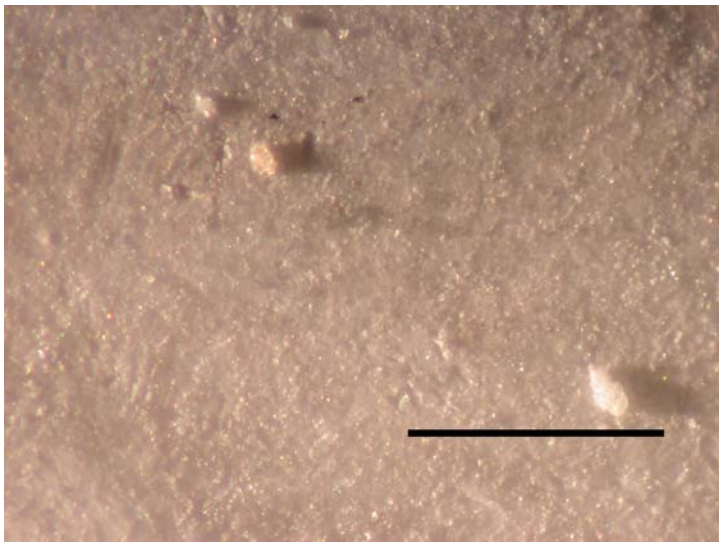
Gipswürfel 16

Gipswürfel 16 wurde 14 Tage in unbeimpftem Medium gelagert. Die Aufnahme zeigt eine kaum veränderte Oberfläche. Es ist zu einer leichten Anlösung gekommen, die in der Aufnahme oben links erkennbar ist. Deutlich tritt die dunkle Bänderung des Anhydrit- Würfels in Erscheinung. Nach 14 Tagen war es bei dem Würfel zu einer Gewichtsabnahme von 2,16 M% gekommen, ein mit Würfel 4 (in D. vulgaris- Kultur gelagert) vergleichbares Ergebnis. Das Steinmaterial zeigte keine farblichen Unterschiede zu den übrigen Gipswürfeln. Die blaue Farbigkeit der Aufnahme ist auf die Beleuchtung des Objektes im Mikroskop zurückzuführen.



Gipswürfel 17

Die Oberfläche des Gipswürfels 17 präsentiert sich nach zweiwöchiger Lagerung in unbeimpfter Puffer- Medium- Mischung im Verhältnis 4:1 ebenfalls weitgehend unverändert. Deutlich ist der kristalline Charakter des Steinmaterials erkennbar. Bei Würfel 17 kam es zu einer Gewichtsabnahme von 1,54 M%. Es hat also ein leichtes Anlösen der Oberflächen stattgefunden, welches auf die Lösung und nicht auf Bakterientätigkeit zurückzuführen ist. Die Aufnahme erscheint aufgrund der Beleuchtung blau, das Steinmaterial unterscheidet sich farblich nicht von den übrigen Anhydrit- Würfeln.



Gipswürfel 18

Um zu ermitteln, wie groß die Anlösung der Oberflächen durch den unbeimpften Puffer ist, wurde Gipswürfel 18 für zwei Wochen in reinem Puffer gelagert. Der Gewichtsverlust ist mit 0,04 M% sehr gering. Die Oberfläche erscheint annähernd unverändert mit kleinen aufliegenden Resten der Pufferlösung. Offensichtlich ist die Veränderung der Steinoberflächen bei den vorigen Würfeln fast ausschließlich auf die Bakterientätigkeit zurückzuführen.

Fotodokumentation II

Durchführung der mikrobiellen Salzreduzierung an Probekörpern aus Sandstein aus Dresden im Labor

Die vorliegende Fotodokumentation zeigt die Vor-, Zwischen- und Endzustände der im Labor durchgeführten bakteriellen Salzreduzierung. Weiterhin werden die UV- Aufnahmen der Kompressensysteme / Folien nach der Abnahme und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Probenmaterials vor und nach der Behandlung dargestellt.

Bei dem Steinmaterial handelt es sich um zwei Ausbaustücke eines Barock- Brunnens aus Dresden, die nicht wieder eingebaut werden und daher für die Versuche von den Sächsischen Sandsteinwerken Pirna zur Verfügung gestellt wurden.

Bei der Versuchsdurchführung kamen drei verschiedene Kompressensysteme zum Einsatz: eine zweischichtige Polypropylen- Folie, eine dreischichtige Polypropylen- Folie sowie eine Carbopol- Paste. Alle drei Systeme wurden mit Bakterienlösung besprüht bzw. hergestellt.

Insgesamt wurden 10 Probeflächen angelegt: die drei Kompressensysteme wurden je mit beiden Desulfovibrio- Arten hergestellt (Probefläche 1-6). Darüber hinaus wurde eine dreischichtige PP- Folie mit aqua dest. angesetzt und aufgetragen(Probefläche 7). Die Probeflächen 8 und 9 wurden jeweils mit unbeimpfter Puffer- Medium- Mischung im Verhältnis 4:1 hergestellt und als Carbopol- Kompresse sowie dreischichtige PP- Folie appliziert. Für den Vergleich erfolgte eine eintägige Applikation einer Ammoniumcarbonat-Kompresse. Die Probeflächen sind wie folgt gekennzeichnet:

Probefläche Nr	Foliensystem	Bakterienlösung	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein II	3 / 6 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein I	3 / 6 Tage
3	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein II	3 / 6 Tage
4	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein I	3 / 6 Tage
5	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein II	3 / 6 Tage
6	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein I	3 / 6 Tage
7	PP- Folie 3- schichtig	aqua dest.	Sandstein II	3 Tage
8	Carbopol	Puffer- Medium	Sandstein II	3 Tage
9	PP- Folie 3- schichtig	Puffer- Medium	Sandstein II	3 Tage
10	Arbocel (Buchencellulose)	Ammoniumcarbonat	Sandstein II	1 Tag

Da das Probematerial etwas begrenzt war, wurde die Dauer des Versuchs an denselben Objektebereichen variiert. Die Kompressen wurden zunächst drei Tage auf die Oberflächen appliziert. Anschließend wurden die Kompressen abgenommen, Oberflächenkrustenproben und Kompressenproben genommen und der Zustand fotografisch erfasst. Die Kompressen wurden erneut appliziert und der Versuch weitere 3 Tage (insgesamt 6 Tage) fortgesetzt.

Die Dokumentation der Vor-, Zwischen- und Endzustände eines Probesteines ist für die beiden Probesteine getrennt aufgeführt: die erste Seite zeigt den Vor- und Zwischenzustand sowie die Steinoberflächen nach dreitägiger Applikation. Die Folgeseite zeigt die UV-Aufnahmen der Kompressen nach 3 Tagen Applikation. Anschließend sind die Dokumentationsfotos des Zustandes der Steinoberflächen nach 6 Tagen und nach 2 Wochen aufgezeigt, gefolgt von den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen des Vorzustandes des jeweiligen Steines sowie zweier Endzustände.

Die Aufnahme des Vorzustandes zeigt die zu beprobende Fläche vor der Probennahme und Applikation der Kompressen.

Die Zwischenzustandsaufnahme dokumentiert die Art der aufgebrachten Kompresse und Methode der Fixierung auf der Oberfläche. Dabei unterscheiden sich die Probeflächen mit zweifacher PP- Folie nicht von denen mit dreifacher PP- Folie. Der Unterschied der Folien ist lediglich von der Vorderseite der Kompresse aus erkennbar.

Die dritte Aufnahme dokumentiert den Endzustand der Probeflächen nach drei Tagen. Nach der Probennahme wurden die Kompressen erneut auf die Oberflächen aufgebracht und dort erneut für drei Tage bei regelmäßigem Nachfeuchten belassen.

Es folgen drei Aufnahmen der unterschiedlichen Folien- bzw. Kompressensysteme nach dreitägiger Applikation unter UV- Licht.

Die zweite Endzustandsaufnahme dokumentiert den Zustand der behandelten Objektoberflächen nach 6 Tagen und endgültiger Abnahme der Kompressen sowie erneuter Probennahme. Die Oberflächen der PP- Folien- Kompressen ließen eine Nachreinigung nicht notwendig erscheinen. Die Oberflächen der mit Carbopol behandelten Bereiche wurden vorsichtig mit aqua dest. und Pinsel nachgereinigt.

Die letzte Aufnahme zeigt die gereinigten Objektbereiche zwei Wochen nach Versuchsende. Dabei wird der etwaige Reinigungserfolg aufgezeigt. Es folgen wiederum UV- Aufnahmen der unterschiedlichen Kompressensysteme nach 6 Tagen Versuchsdauer.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Proben des Vor- und Endzustandes zu erreichen, wurden die Endzustandsproben nach drei und sechs Tagen in unmittelbarem Anschluss an die Vorzustandsproben genommen.

Alle UV- Aufnahmen wurden bei 400facher Vergrößerung hergestellt.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen jeweils den Vorzustand des Steinmaterials sowie zwei markante Endzustände. Sie wurden im Labor für Mikrobiologie der Carl von Ossietzky- Universität Oldenburg hergestellt. Die Vergrößerungen sind jeweils unter den Aufnahmen angegeben.

Stein I Vorzustand

Probeflächen 2, 4 und 6 auf dem Dresdener Sandstein I

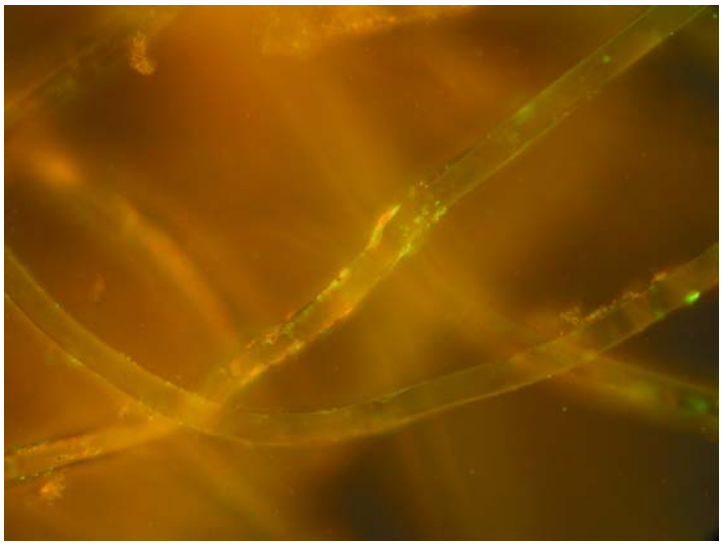
Auf Stein I wurden die Probeflächen 2, 4 und 6 angelegt. Es handelt sich dabei um die drei verschiedenen Foliensysteme, die mit dem Bakterium Desulfovibrio desulfuricans beimpft wurden. Im Vorzustand präsentiert sich der zu behandelnde Bereich mit der, für sächsischen Sandstein charakteristischen gräulichen Gipskruste im Bereich der Hohlkehle.

Zwischenzustand

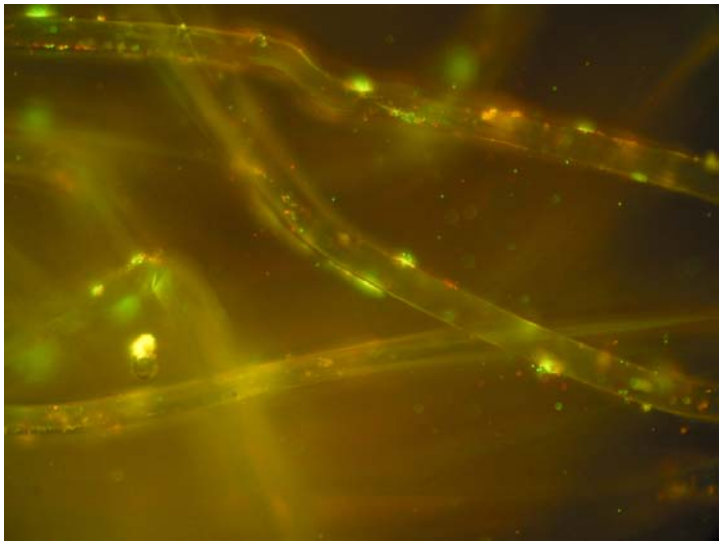
Nach der Probennahme, die mittels Dremel erfolgte, wurden die drei verschiedenen Kompressensysteme aufgebracht. Links und mittig sind die beiden PP- Folien zwei- und dreischichtig zu sehen. Sie wurden zur besseren Haftung mit Teilen einer Plastikmatte abgedeckt und so in Position gehalten. Rechts ist die Carbopol- Kompresse zu sehen, die zur Einschränkung der Verdunstung mit PE- Folie abgedeckt wurde.

nach dreitägiger Applikation

Nach drei Tagen wurden die Kompressen kurzzeitig von den Objektoberflächen entfernt. Mittels Dremel wurde aus jeder Probefläche eine Oberflächenprobe im Anschlussbereich an die Vorzustandsprobe entnommen und verpackt. Die Oberflächen zeigten zu diesem Zeitpunkt keinen Reinigungserfolg. Anschließend wurden die Kompressen nachgenässt und wieder auf die Oberflächen aufgebracht.

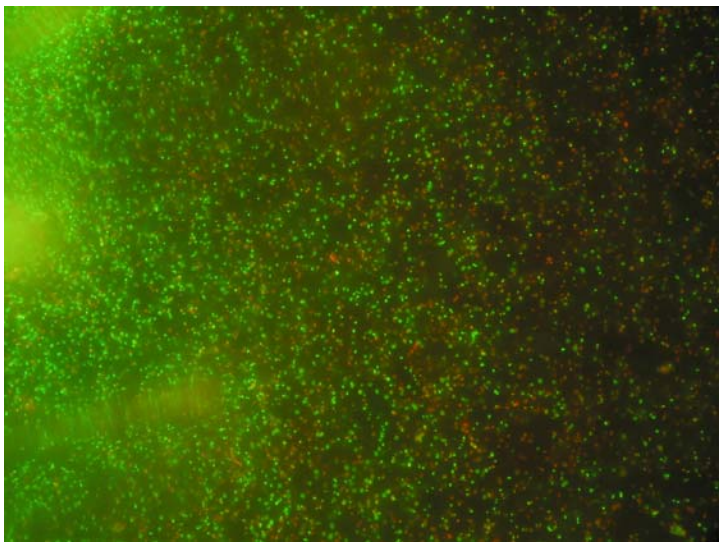


UV- Aufnahme
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Die UV- Aufnahme zeigt einzelne Fasern der zweischichtigen PP- Folie, nachdem diese sich drei Tage auf der Steinoberfläche befunden hatte. Auf den Oberflächen der Fasern hatten sich zahlreiche Bakterien abgelagert. Etwa die Hälfte der Organismen zeigte grüne Fluoreszenz. Auch in dem Baclight- Tropfen konnten zahlreiche Organismen nachgewiesen werden.



UV- Aufnahme
PP- Folie dreischichtig

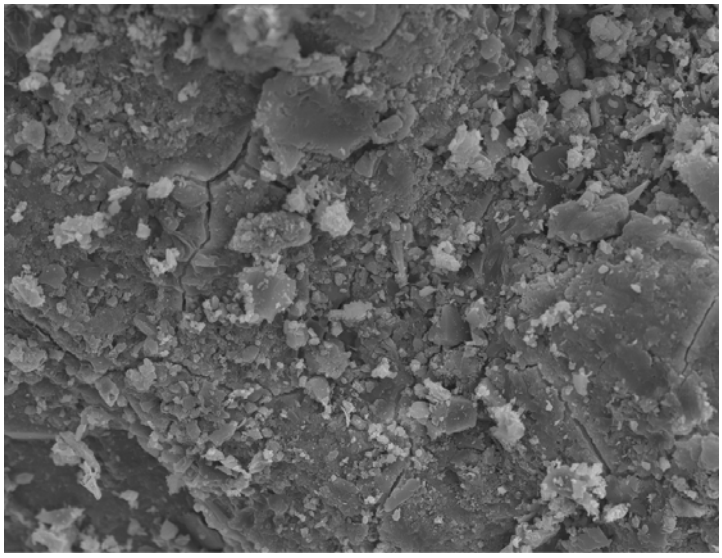
In der Aufnahme wird die Anlagerung der Bakterien auf den Faseroberflächen deutlich. Durch die starke Vergrößerung (400fach)wird die Plastizität der Fasern deutlich. Eine Verunreinigung durch Fremdkulturen ist nicht erkennbar. Bei der Betrachtung im Mikroskop war ein Unterschied zwischen zwei- und dreischichtiger Kompresse nicht erkennbar.



UV- Aufnahme
Kompresse Carbopol
Die Betrachtung der Carbopol-Kompresse ergab die höchste Zelldichte in den unterschiedlichen Kompressen. Über 80% der Bakterien zeigten grüne Fluoreszenz, Bewegung war jedoch nicht zu beobachten.
Das Carbopol zeigte eine starke grüne Eigenfluoreszenz, die jedoch die Sichtbarkeit der Bakterien nicht einschränkt.

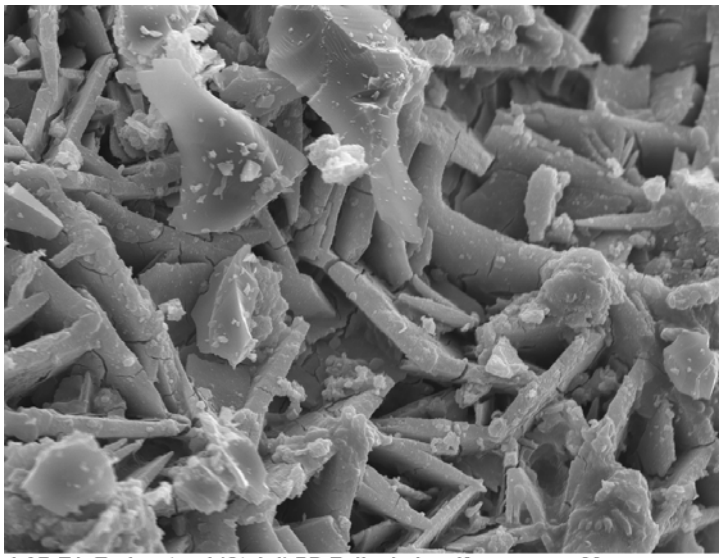
nach sechstätiger Applikation
Im Endzustand nach 6 Tagen nach Abnahme der Kompressen und anschließender Probennahme für den quantitativen Gipsnachweis zeigen die Probeflächen auf Stein 1, die alle mit Desulfuricans- Kulturen beimpft waren, vorerst keine optische Veränderung.

Endzustand nach 2 Wochen
Zwei Wochen nach Abnahme der Kompressen zeigen die Oberflächen weiterhin keine optische Veränderung, lediglich eine minimale Aufhellung war im Bereich der Kompressen links und mittig zu beobachten.



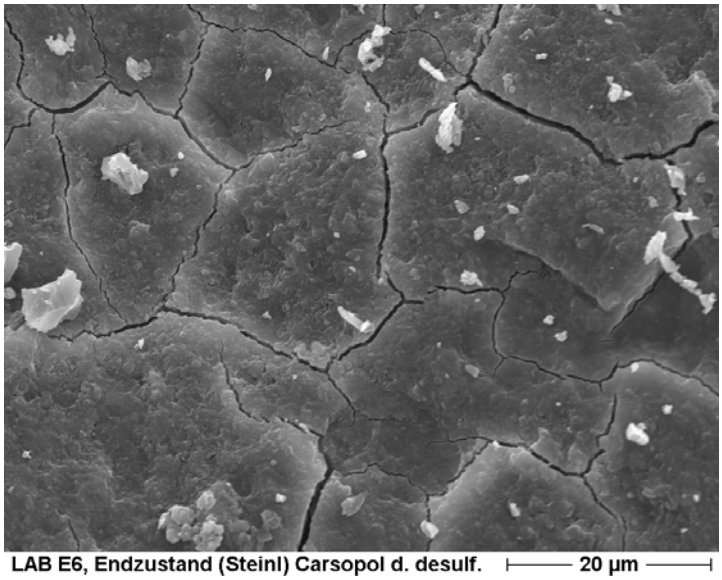
REM- Aufnahme der Vorzustandes, Stein I

Die Aufnahme zeigt die Oberfläche einer Vorzustandsprobe von Stein I. Deutlich erscheinen die helleren aufliegenden Partikel des auskristallisierten Salzes. Im Hintergrund ist das Kraquele des Untergrundes erkennbar. Besiedlung der Oberflächen durch Mikroorganismen war im Vorzustand nicht erkennbar.



REM- Aufnahmen des Endzustandes
Probefläche 4

Die Aufnahme zeigt, dass die gesamte Oberfläche der Probe auch im Endzustand von einem Gipsnadel- Teppich überzogen ist. Bakterien oder andere Mikroorganismen sind nicht erkennbar.



Probefläche 6

Der Vergleich mit der Aufnahme der Probefläche 4 verdeutlicht die unterschiedlichen Erscheinungsformen der Steinoberfläche. Der mit Carbopol behandelte Bereich erscheint weitgehend geschlossen, lediglich leichte Rissbildung ist erkennbar. Es sind keine applizierten Bakterien oder andere Mikroorganismen erkennbar.

Stein II Vorzustand Probeflächen 1,3,5 und 7 auf dem Dresdener Sandstein II

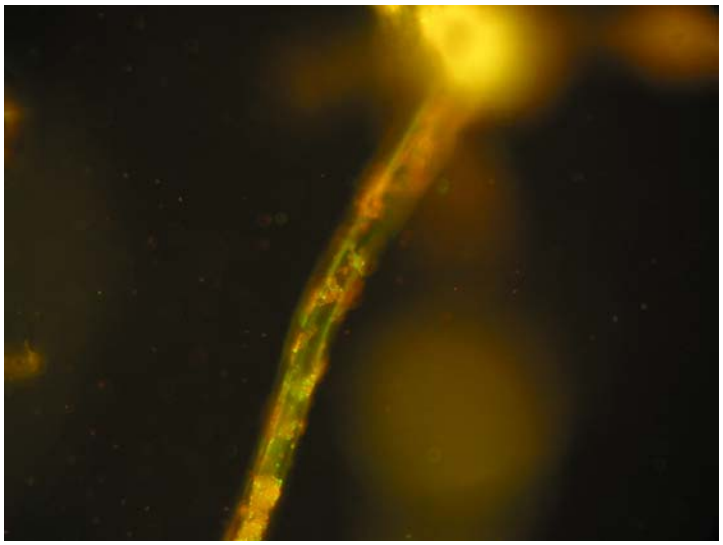
Auf dem zweiten Dresdener Sandstein Stein II wurden die Probeflächen 1,3 und 5 analog zu Stein I angelegt. Sie wurden mit dem Bakterium Desulfovibrio vulgaris angesetzt. Unten links wurde nach dem Vorzustands-foto zusätzlich die Probefläche 7, eine dreischichtige PP- Folie, die mit aqua dest. befeuchtet wurde, angelegt.

Zwischenzustand

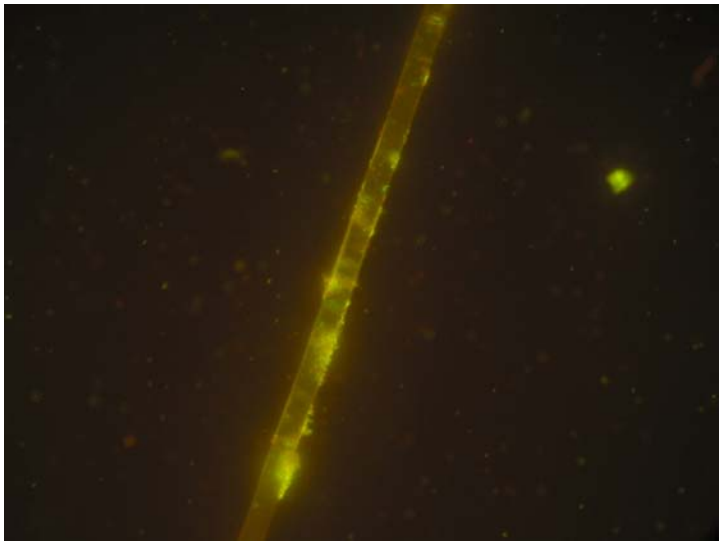
Im Zwischenzustand sind die vier verschiedenen Kompressen auf der Steinoberfläche erkennbar. Oben links ist die zweischichtige, mittig die dreischichtige PP-Folie erkennbar. Unten links ist die Wasser- Kompresse zu sehen, während unten rechts die Carbopol- Kompresse mit der abdeckenden PE- Folie erkennbar ist.

Nach dreitätiger Applikation

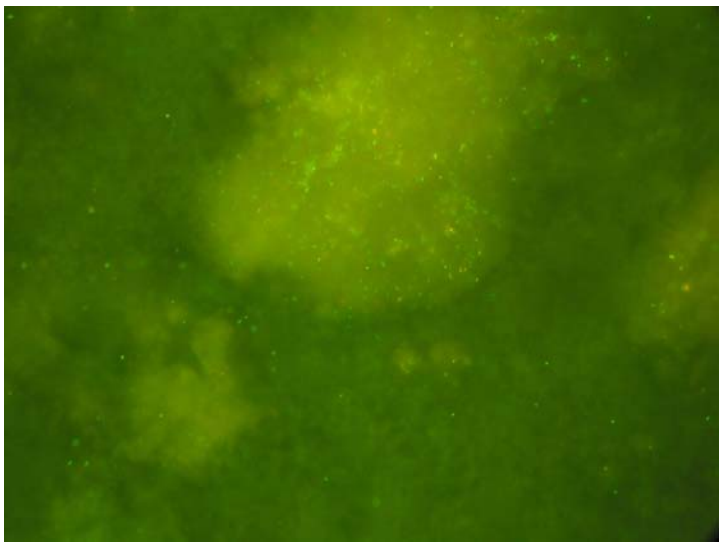
Nach drei Tagen wurden die Kompressen kurzzeitig von den Objektoberflächen entfernt. Mittels Dremel wurde aus jeder Probefläche eine Oberflächen-probe im Anschlussbereich an die Vorzustandsprobe entnom-men und verpackt. Die Oberflächen zeigten zu diesem Zeitpunkt keinen Reinigungs-erfolg. Anschließend wurden die Kompressen nachgenässt und wieder auf die Oberflächen aufgebracht.



UV- Aufnahme
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Die Aufnahme zeigt eine Einzelfaser aus der zweischichtigen PP- Folie, die mit Vulgaris- Kulturen beimpft war. Deutlich erkennbar sind die auf der Oberfläche angelagerten roten und grünen Bakterien. Auch in der umgebenden Lösung konnten zahlreiche Organismen nachgewiesen werden. Etwa 50% der nachgewiesenen Zellen zeigten grüne Fluoreszenz.



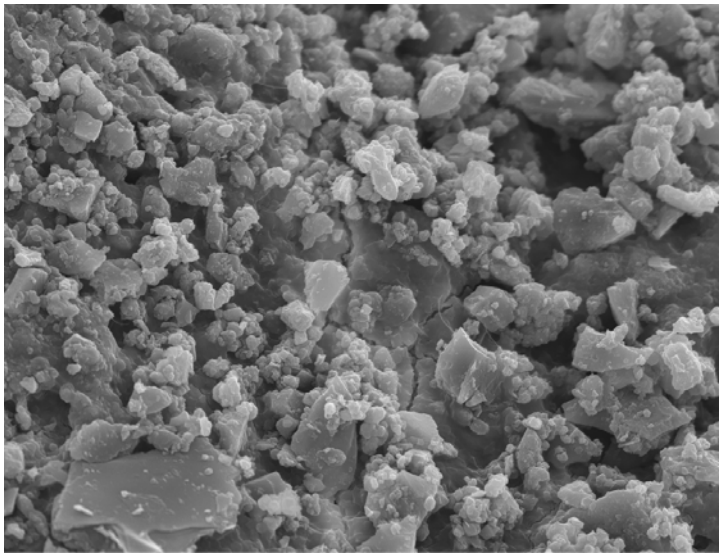
UV- Aufnahme
PP- Folie dreischichtig
Die Betrachtung der Fasern der dreischichtigen PP- Folie ergab keine Unterschiede zu der zweischichtigen Folie. Wiederum hatten sich zahlreiche Bakterien auf der Oberfläche der Fasern angelagert. Auch in dem Baclight-Tropfen konnten zahlreiche Organismen nachgewiesen werden, die sich von den Faseroberflächen abgelöst hatten und in der Lösung schwammen.



UV- Aufnahme
Kompresse Carbopol
Auch die Carbopol- Kompresse mit Vulgaris- Bakterien ist durch eine starke Eigenfluoreszenz gekennzeichnet. Dennoch sind zahlreiche, grün fluoreszierende Zellen erkennbar, die gleichmäßig über die gesamte Oberfläche verteilt sind. Rot fluoreszierende Bakterien sind nicht erkennbar. Bewegung konnte nicht nachgewiesen werden.

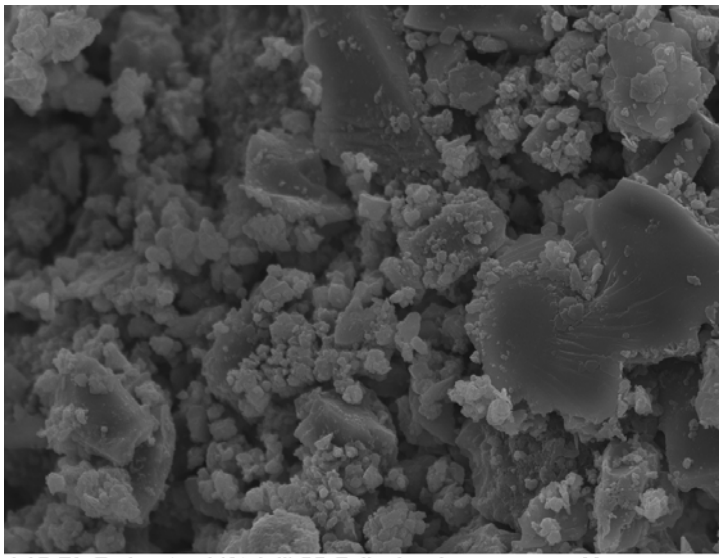
nach sechstägiger Applikation
Im Endzustand nach 6 Tagen unmittelbar nach Abnahme der Kompressen und anschließender Probennahme präsentieren sich die Probeflächen noch etwas feucht, zeigen aber keine optische Verbesserung.

Endzustand nach 2 Wochen
Zwei Wochen nach Abnahme der Kompressen präsentieren sich die gereinigten Oberflächen auf Stein II leicht aufgehellt. Am deutlichsten wird die Veränderung bei der dreischichtigen PP- Kompresse, die mittig auf dem Stein platziert war. Auch die AMC- Kompresse, die mittig am unteren Rand aufgebracht wurde, zeigte ein gutes Reinigungsergebnis. Die mit Carbopol behandelte Fläche rechts unten zeigte die geringsten Veränderungen.



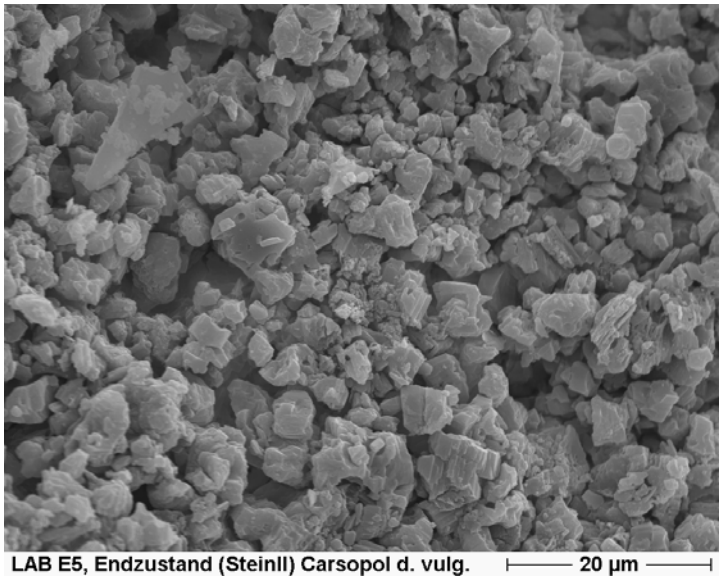
REM- Aufnahme der Vorzustandes, Stein II

Im Vorzustand präsentiert sich die Oberfläche der Probe von Stein II sehr unruhig mit zahlreichen kleinen Partikeln. Im Untergrund ist die schichtige Steinoberfläche erkennbar. Besiedlung durch Mikroorganismen ist im Vorzustand nicht erkennbar.



REM- Aufnahmen des Endzustandes
Probefläche 3

Der Vergleich der Oberfläche mit dem Vorzustand zeigt keine gravierenden Veränderungen. Bakterien oder andere Mikroorganismen sind nicht erkennbar. Deutlich wird die unterschiedliche Struktur des Gipses von sehr feinteilig blumenkohlartig bis schieferig fächerig.



Probefläche 5

Die Aufnahme des Endzustandes der mit Carbopol behandelten Oberfläche zeigt, dass es auch mikroskopisch zu keiner wesentlichen Veränderung der Oberflächen durch die Behandlung gekommen ist. Reste des eingebrachten Materials sind nicht erkennbar. Die Oberfläche wirkt aufgeraut und sehr feinteilig. Mikrobielles Wachstum ist nicht erkennbar.

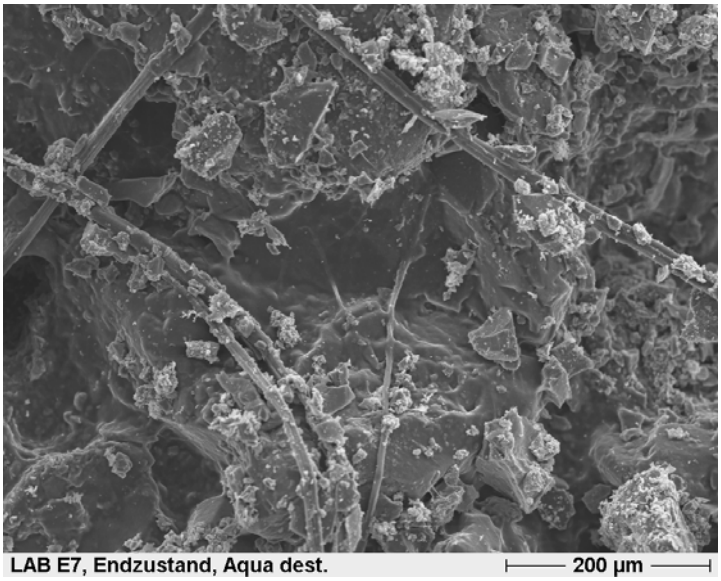
Stein II Seite Vorzustand Probeflächen 8 und 9 auf dem Dresdener Sandstein II seitlich
Zusätzlich zu den Vulgaris-Kompressen wurden auf Stein II die Probeflächen 8 und 9 seitlich angelegt. Es handelt sich hier um genannte „Kontrollproben“: beide Probeflächen wurden mit einer unbeimpften Puffer-Medium- Mischung im Verhältnis 4:1 behandelt. In beiden Probeflächen sind die Probe-entnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis er-kennbar.

Zwischenzustand
Die Aufnahme des Zwischenzustandes zeigt in Probefläche 8 (links) die aufgebrachte Carbopol- Kom-presse und die dreischichtige PP- Folie in Probefläche 9 mittig auf der Steinfläche. Die Probeflächen wurden dreimal täglich, morgens, mittags und abends mit der unbeimpften Puffer- Medium- Mischung nachgefeuchtet.

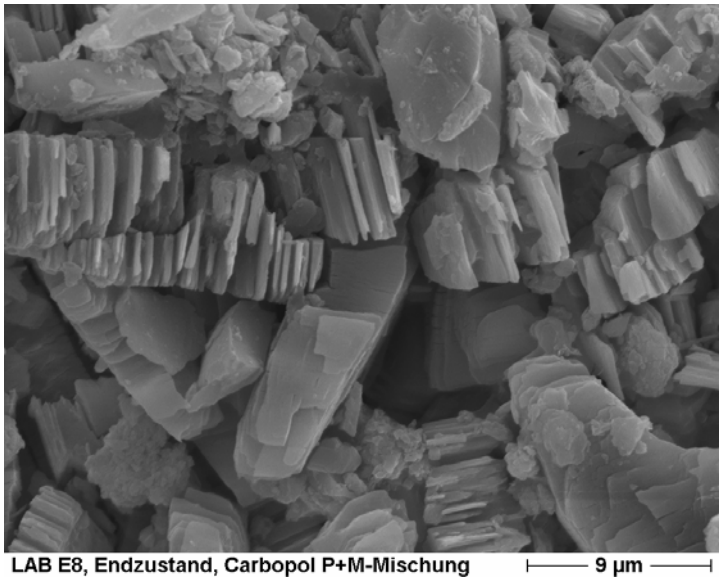
nach dreitägiger Applikation
Nach drei Tagen wurden auch die Neutralkompressen kurz-zeitig von der Oberfläche entfernt. Im direkten Anschluss-bereich an die Vorzustands-proben wurden mit dem Dremel Proben genommen und verpackt. Anschließend wurden die Kompressen neu befeuchtet und erneut auf die Oberflächen aufgebracht.

nach sechstägiger Applikation
Nach 6 Tagen wurden die Kompressen endgültig von den Oberflächen abgenommen. Es erfolgte eine weitere Probennahme. Eine optische Veränderung war unmittelbar nach Abnahme der Kompressen und anschließender Probennahme nicht erkennbar.

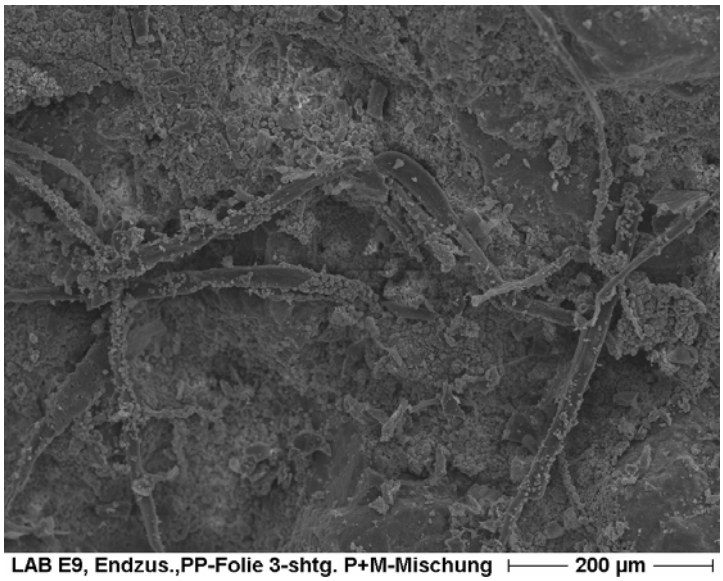
Endzustand nach 2 Wochen
Auch zwei Wochen nach Abnahme der Kompressen zeigten die Probeflächen an der Seite von Stein II keine optischen Veränderungen. Eine leichte Aufhellung geht auf den bei der Probennahme entstandenen Steinstaub zurück.



REM- Aufnahmen des Endzustandes
Probefläche 7
Die Aufnahme zeigt eine Probe aus dem mit einer aqua- dest. Kompresse versehenen Bereich. Deutlich treten die Pilzhyphen oder anderen Filamente in Erscheinung. Ansonsten unterscheidet sich die Oberfläche nicht von den mit Biokompressen versehenen Bereichen.



Probefläche 8
Im Bereich der Probe aus Probefläche 8, die mit einer bakterienfreien Kompresse versehen war, konnten keine Mikroorganismen nachgewiesen werden. Die Oberfläche erscheint deutlich weniger angelöst. Das Steinmaterial weist weiterhin Gips auf, der hier fächerartig schieferig erscheint.



Probefläche 9
Die REM- Aufnahme der Probefläche 9 nach der Behandlung zeigt keinen Unterschied zu der mit aqua dest. behandelten Probe. Deutlich sind fädenartige Pilzhyphen erkennbar, die sich über die gesamte Oberfläche erstrecken. Die Oberfläche erscheint etwas kleinteiliger und weniger geschlossen als der mit aqua dest. behandelte Bereich in der Aufnahme von Probefläche 7. Auffällig erscheint der stärkere Befall von Oberflächen, die mit unbeimpftem Medium behandelt wurden.

Stein II Probefläche 10
Ammoniumcarbonat- Kompresse
Vorzustand

Die Aufnahme zeigte die Probefläche 10 im Vorzustand. Sie wurde nach Abschluss der Bakterienkompressen unterhalb der Probefläche 3 aufgebracht.
Vor der Applikation wurde eine Krustenprobe mit dem Dremel für den quantitativen Gipsnachweis entnom-men. Die Kompresse dient dem Vergleich des Reinigungsergebnisses der Biokompresse mit einer Standard-salzreduzierung.

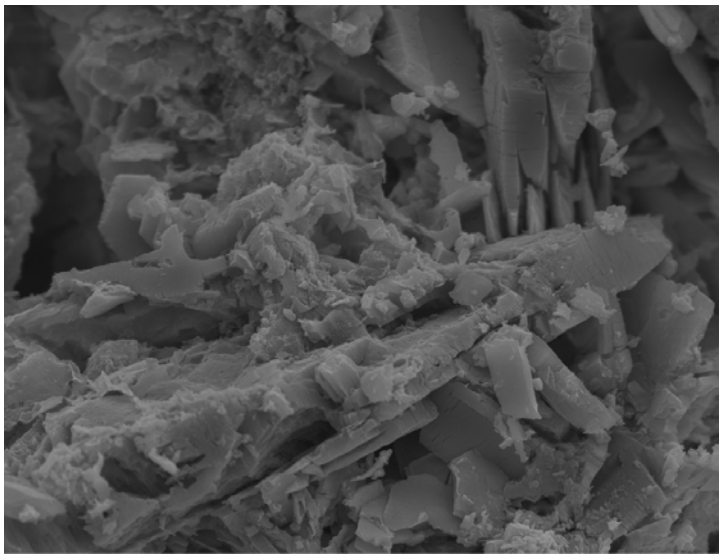
Zwischenzustand

Auf der Probeentnahmestelle wurde eine Kompresse aus Arbocel (Buchencellulose) und einer gesättigten Ammoniumcarbonat-Lösung aufgebracht. Damit die Kompresse nicht zu schnell auftrocknet, wurde sie nach der Applikation mit einer PE- Folie abgedeckt und verblieb ohne Nachnässen für einen Tag auf der Oberfläche. Eine Nachbehandlung erfolgte in Form einer Neutralkompresse aus Arbocel, die bis zum vollständigen Auftrocknen auf der Oberfläche verblieb.

Endzustand

Die Ammoniumcarbonat- Kompresse wurde nach einem Tag von der Oberfläche abgenommen. Sie war zu diesem Zeitpunkt komplett getrocknet. Eine Nachbehandlung erfolgte mit einer Neutralkompresse. Diese wurde ebenfalls nach einem Tag entfernt. Reste des Arbocels wurden mit Pinsel von der Oberfläche entfernt. Deutlich ist ein Reinigungserfolg erkennbar, der nach der vergleichsweise kurzen Einwirkzeit stärker ausfällt als bei den „Biokompressen“. Auch dem behandelten Bereich wurde eine Probe für den quantitativen Gipsnachweis entnommen.

Eine Verstärkung des Reinigungserfolges nach zwei Wochen konnte nicht beobachtet werden.



REM- Aufnahme der Vorzustandes, Stein I

Die Oberfläche der mit Ammoniumcarbonat behandelten Probe unterscheidet sich deutlich von allen anderen. Reste des Kompressenmaterials sind erkennbar. Ebenso sind die für Gips typischen Kristallisationsformen ersetzt durch andere Salzbildungen, hier vermutlich Calciumcarbonat. Die Oberfläche erscheint stärker geschichtet.

Fotodokumentation III

Durchführung der mikrobiellen Salzreduzierung an Schloss Fürstenstein / Książ, Polen

In der vorliegenden Fotodokumentation sind die Vor-, Zwischen- und Endzustände des an Schloss Fürstenstein / Książ in Polen durchgeführten Versuchs der bakteriellen Salzverminderung aufgezeigt.

Bei der Durchführung kamen drei verschiedene Foliensysteme zum Einsatz: eine 2-schichtige Polypropylen- Folie, eine dreischichtige Polypropylen- Folie sowie eine Carbopol-Paste. Alle drei Systeme wurden mit Bakteriensuspension besprüht bzw. hergestellt.

Insgesamt wurden 24 Probeflächen angelegt und fotografisch dokumentiert. Sie wurden wie folgt gekennzeichnet:

Probefläche Nr	Foliensystem	Bakteriensuspension	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
3	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
4	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
5	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfu.+ vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
6	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfu.+ vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
7	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
8	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
9	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
10	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
11	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfu.+ vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
12	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfu.+ vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
13	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
14	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
15	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
16	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
17	Carbopol	D. desulfu.+ vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
18	Carbopol	D. desulfu.+ vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
19	PP- Folie 2- schichtig	reiner Puffer	Sandstein gelb	6 Tage
20	PP- Folie 3- schichtig	reiner Puffer	Sandstein gelb	6 Tage
21	Carbopol	reiner Puffer	Sandstein gelb	6 Tage
22	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein rot	3 Tage
23	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein rot	3 Tage
24	Carbopol	D. desulfo.+ vulgaris	Sandstein rot	3 Tage

Tabelle der Probeflächen und Kompressenbehandlungen

Es sind jeweils die Fotos einer Probefläche auf einer Seite zusammengefasst.

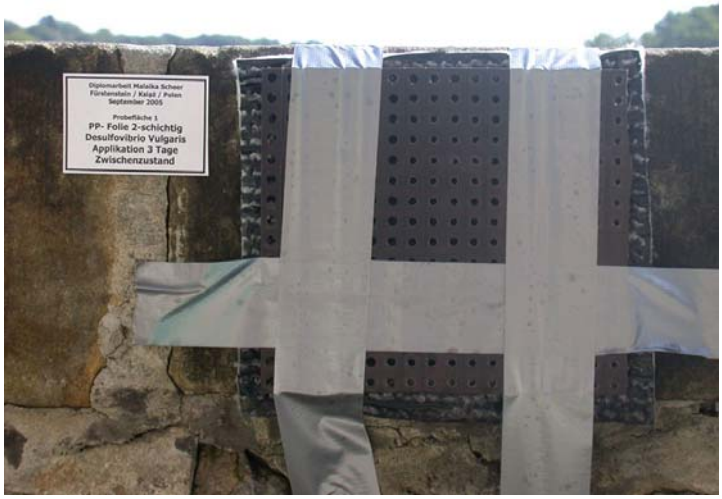
Die Aufnahme des Vorzustandes zeigt die zu beprobende Fläche mit den drei Probeentnahmestellen des Vorzustandes. Sie sind durch rote Punktmarkierungen gekennzeichnet.

Die Zwischenzustandsaufnahme dokumentiert die Art der aufgebrachten Kompresse und Methode der Fixierung auf der Oberfläche. Dabei unterscheiden sich die Probeflächen mit zweifacher PP- Folie nicht von denen mit dreifacher PP- Folie. Die verschiedenen Farbigkeiten der aufliegenden Fußmatten wurden nur zur Unterscheidung gewählt. Dabei wurden die Kompressen mit Desulfovibrio vulgaris- Kulturen mit braunen Abdeckungen, die Kompressen mit Desulfovibrio desulfuricans- Kulturen mit grünen Abdeckungen versehen. Die Kompressen mit einer Kombination aus Vulgaris- und Desulfuricans- Bakterien wurden ebenfalls mit braunen Matten abgedeckt.
Die Nachnässung der Kompressen erfolgte regelmäßig über die Flankenbereiche und die löcherige Oberfläche der Matte. Lediglich im Bereich des Gewebebandes war eine gleichmäßige Nachnässung der Folien nicht uneingeschränkt möglich. Allerdings zeigte sich nach Abnahme der Kompresse, dass in der Mitte der Kompresse die größte Feuchtigkeit vorherrschte, sich die Feuchte also auch innerhalb der Kompresse zur Mitte hin zurückzieht.
Die Aufnahme des Endzustandes dokumentiert die Probeflächen direkt nach Abnahme der Kompressen und abschließender Probennahme. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Proben des Vor- und Endzustandes zu erreichen, wurden die Endzustandsproben in unmittelbarem Anschluss an die Vorzustandsproben genommen. Die weiße Punktmarkierung zur Kennzeichnung der Probennahme befindet sich direkt über der Probeentnahmestelle. Abschließend wurden alle Etiketten und Punktmarkierungen entfernt.
Partiell sind Reste der Gewebeklebung erkennbar, die jedoch bei regelmäßiger Bewitterung mit der Zeit verwinden sollten.

Vorzustand

Probefläche1
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Applikation 3 Tage

Die Aufnahme zeigt die Probefläche 1 im Vorzustand.
Die Oberfläche ist durch eine starke schwarze Verkrustung gekennzeichnet. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.



Zwischenzustand

In der Aufnahme ist die Probefläche im Zwischenzustand zu sehen. Sie wurde mit einer Kompresse aus zweischichtiger Folie und abdeckender Matte versehen, die mit Gewebeband an dem Bauteil befestigt wurden. Die Kompresse verblieb 3 Tage auf der Steinoberfläche und wurde regelmäßig mit Bakteriensuspension nachgenässt.

Endzustand

Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Die Proben wurden unmittelbar neben den Vorversuchsproben genommen und sind mit weißen Punktmarkierungen direkt oberhalb der Probeentnahmestellen gekennzeichnet. Die Oberflächen zeigten optisch keine Veränderung.

Vorzustand
Probefläche 2
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Applikation 6 Tage
In der Aufnahme ist die Probefläche 2 im Vorzustand zu sehen. Neben einer schwarzen Kruste zeigt die Oberfläche Besiedlung durch Flechten und Pilze. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse. Sie wurde entsprechend der Probefläche 1 behandelt, allerdings verblieb die Kompresse 6 Tage auf der Steinoberfläche. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

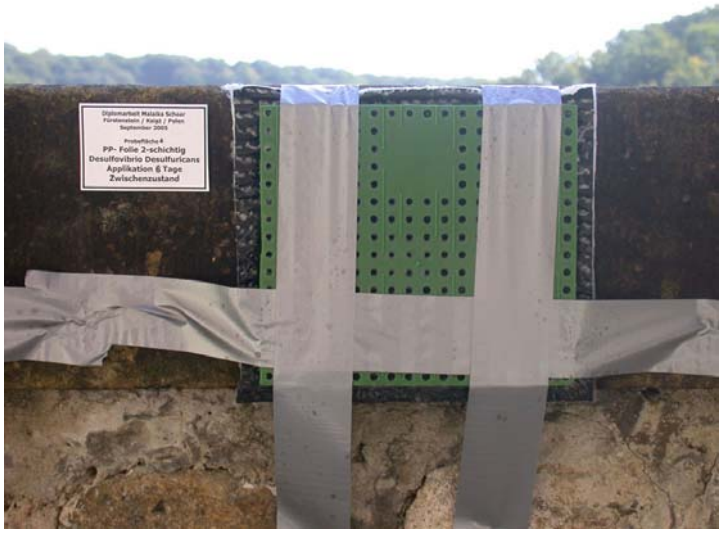
Endzustand
Probefläche 2 zeigt im Endzustand keine optischen Veränderungen nach 6 Tagen Kompressenbehandlung. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 3
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 3 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 3 im Vorzustand. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Steinoberfläche wurde mit einer Kompresse aus zweischichtiger PP- Folie und Abdeckmatte versehen. Die Kompressen wurden mit Gewebeband auf der Oberfläche fixiert. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung gekennzeichnet. Die Oberflächen zeigen keine Veränderung gegenüber dem Vorzustand.

Vorzustand
Probefläche 4
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 6 Tage
In der Aufnahme ist Probefläche 4 im Vorzustand zu sehen.
Die Oberfläche zeigt eine unterschiedlich starke Krustenbildung. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.



Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse. Der Bereich wurde entsprechend Probefläche 3 behandelt, die Kompresse verblieb jedoch 6 Tage auf der Oberfläche. Die Fläche wurde regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Die Probefläche 4 präsentiert sich im Endzustand weitgehend unverändert. Die weißen Punktmarkierungen bezeichnen die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung.

Vorzustand
Probefläche 5
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio vulgaris + desulfuricans
Applikation 3 Tage
Im Vorzustand präsentiert sich die Probefläche 5 mit schwarzen Verkrustungen unregelmäßiger Dicke und Verschwärzung.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus zweischichtiger PP- Folie. Bei der Bakteriensuspension handelte es sich um eine Mischung aus beiden Bakterienstämmen. Die Flächen wurden regelmäßig durch Besprühen mit Bakteriensuspension nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet. Eine optische Veränderung durch die Kompressenbehandlung ist nicht erkennbar.

Vorzustand
Probefläche 6
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio vulgaris + desulfuricans
Applikation 6 Tage
In der Aufnahme ist die Probefläche 6 im Vorzustand zu sehen. Die schwarze Kruste in dem Bereich ist eher dünn. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Im Zwischenzustand präsentiert sich die Probefläche mit aufliegenden Kompressenmaterialien aus dreischichtigem PP-Vlies, Abdeckmatte und fixierendem Gewebeband. Die Kompresse verblieb 6 Tage auf der Steinoberfläche. Durch regelmäßiges Besprühen wurde die Kompresse feucht gehalten.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Die weißen Punktmarkierungen bezeichnen die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung. Sie sind von links nach rechts durchnummeriert. Die Proben wurden unmittelbar im Anschlussbereich der Vorzustandsproben entnommen.

Vorzustand
Probefläche 7
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Applikation 3 Tage
Das Foto zeigt die Probefläche 7 im Vorzustand.
Der Bereich zeigt eine intensive Verschwärzung. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quanttativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus dreischichtigem PP- Vlies. Dieses ist beidseitig mit einer gedochteten Folie versehen, die die schnelle Verdunstung einschränken soll. Die Flächen wurden regelmäßig durch Besprühen nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet. Eine optische Veränderung ist nicht erkennbar.

Vorzustand
Probefläche 8
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Applikation 6 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 8 im Vorzustand.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet. Rechts ist eine der Zementfugen zu sehen, die vermutlich für den Eintrag von Schadsalzen verantwortlich sind.

Zwischenzustand
Als Kompressenmaterial kam bei Probefläche 8 das gleiche Material wie bei Probefläche 7 zum Einsatz, allerdings wurde die Kompresse für 6 Tage auf der Oberfläche belassen. Die Flächen wurden regelmäßig mit Bakteriensuspension nachgenässt.

Endzustand
In der Aufnahme ist die Probefläche im Endzustand zu sehen. Optische Veränderungen gegenüber dem Vorzustand waren nicht erkennbar. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 9
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 3 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 9 im Vorzustand.
Die Oberfläche ist durch eine gleichmäßige schwarze Kruste gekennzeichnet. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus dreischichtiger PP- Folie, die auf beiden Seiten mit Folie abgedichtet und gedochtet war. Die Folie wurde mittels Abdeckmatte und Gewebeband auf der Oberfläche fixiert. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Im Endzustand präsentiert sich die Oberfläche des beprobten Steinbereiches optisch unverändert. Die weißen Punktmarkierungen befinden sich unmittelbar über den Probeentnahmestellen.

Vorzustand
Probefläche 10
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 6 Tage
In der Aufnahme ist Probefläche 10 im Vorzustand nach der Probennahme zu sehen.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus zweischichtiger PP- Folie und abdeckendem Mattensystem, das mit Gewebeband an dem Bauteil befestigt wurde. Die Flächen wurden regelmäßig mit Bakteriensuspension nachgenässt.

Endzustand
Im Endzustand präsentiert sich die Probefläche nach Abnahme der Kompresse optisch unverändert. Eine Aufhellung wurde nicht beobachtet. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 11
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio vulgaris + desulfuricans
Applikation 3 Tage

In der Aufnahme ist die Probefläche 11 im Vorzustand zu sehen. Sie zeigt eine dünne schwarze Kruste.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis gekennzeichnet.

Zwischenzustand

Probefläche 11 wurde mit aufgebrachter Kompresse aus dreischichtiger PP- Folie und abdeckendem Mattensystem versehen, die mit Gewebeband auf der Oberfläche fixiert wurden. Die Flächen wurden regelmäßig durch Besprühen mit Bakteriensuspension nachgenässt.
Zum Einsatz kam hier eine Mischung aus beiden Bakterienstämmen.

Endzustand

Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet. Eine optische Veränderung gegenüber dem Vorzustand konnte nicht nachgewiesen werden.

Vorzustand
Probefläche 12
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio vulgaris + desulfuricans
Applikation 6 Tage
Das Foto zeigt Probefläche 12 im Vorzustand.
Der Bereich zeigt eine dünne schwarze Kruste, die durch Bewuchs von Flechten und Pilzen unregelmäßig erscheint. Die roten Punktmar-kierungen bezeichnen die Probeent-nahmestellen für den quanti-tativen Gipsnachweis

Zwischenzustand
Die Probefläche 12 wurde entsprechend zu Probefläche 11 mit beiden Bakterienstämmen behandelt, allerdings verblieben die Kompressen 6 Tage auf der Oberfläche. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Eine optische Veränderung erfolgte durch die Kompressen-behandlung nicht. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekenn-zeichnet.

Vorzustand
Probefläche 13
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio vulgaris
Applikation 3 Tage
In der Aufnahme ist die Probefläche 13 im Vorzustand zu sehen. Sie ist nördlich ausgerichtet und weist eine dünne schwarze Kruste auf.
Die roten Punktmarkierungen kennzeichnen die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus einer Lage Japanpapier, aufgetragener Carbopol- Paste, einer abdeckenden Lage Japanpapier und Abdeckfolie. Die Fläche wurde regelmäßig durch Besprühen mit Bakteriensuspension nachgenässt.

Endzustand
Im Endzustand präsentiert sich die Oberfläche des Probenbereichs optisch unverändert. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 14
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio vulgaris
Applikation 6 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 14 in nördlicher Ausrichtung im Vorzustand. Die Kruste ist hier sehr dünn.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis gekennzeichnet.

Zwischenzustand
In der Aufnahme ist die Probefläche im Zwischenzustand zu sehen. Die Oberfläche wurde mit der gleichen Kompresse wie Testfläche 13 versehen, die Kompresse verblieb jedoch 6 Tage. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Die weißen Punktmarkierungen befinden sich unmittelbar oberhalb der Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung und sind von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 15
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 3 Tage
Probefläche 15 wurde an der Mauerabdeckung mit südlicher Ausrichtung angelegt. Die Oberfläche scheint sehr unregelmäßig.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Probefläche wurde mit einer Carbopol- Kompresse versehen. Die Testflächen waren den ganzen Tag intensiver Sonnenbestrahlung ausgesetzt und trockneten sehr schnell auf. Das Carbopol wanderte in den Stein ein. Die Flächen wurden regelmäßig durch Besprühen mit Bakteriensuspension nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Die weißen Punktmarkierungen bezeichnen die Probeentnahmestellen des Endzustandes. Die Probeflächen wurden sorgfältig mit Wasser nachgereinigt. Eine optische Veränderung im Vergleich zu Vorzustand konnte jedoch nicht beobachtet werden.

Vorzustand
Probefläche 16
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 6 Tage
In der Aufnahme ist Probefläche 16 erkennbar. Sie zeigt eine sehr unregelmäßige Oberfläche. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

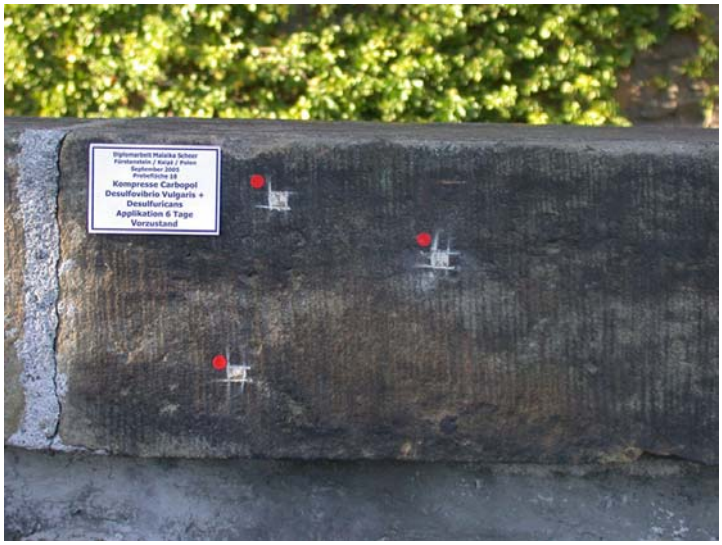
Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit Carbopol- Kompresse. Das Material wurde auf eine Japanpapierschicht aufgetragen, mit einer weiteren Lage Japanpapier abgedeckt und anschließend mit Abdeckfolie weitgehend luftdicht verschlossen. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Im Endzustand präsentiert sich die Oberfläche der Testfläche 16 optisch unverändert. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 17
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio vulgaris + desulfuricans
Applikation 3 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 17 im Vorzustand. Die Oberfläche ist mit starken Krusten versehen, die partiell bereits abgeplatzt sind. Die roten Punktmarkierungen kennzeichnen die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus Japanpapier, Carbopol, Japanpapier und Abdeckfolie. Die Flächen wurden regelmäßig mit Bakteriensuspension nachgefeuchtet. Jedoch trocknete die Testfläche aufgrund der intensiven Sonneneinstrahlung sehr schnell auf.

Endzustand
Nach Abnahme der Kompressen erfolgte eine vorsichtige Nachreinigung mit Pinsel und aqua dest.. Die Oberfläche präsentierte sich anschließend weitgehend unverändert. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung gekennzeichnet.



Vorzustand
Probefläche 18
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio vulgaris + desulfuricans
Applikation 6 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 18 im Vorzustand. Deutlich ist die unterschiedlich starke Verschwärzung des Bereichs erkennbar. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus Japanpapier, Carbopol und Zellstoff mit Abdeckfolie. Sie verblieb 6 Tage auf der Steinoberfläche, war jedoch nach 3 Tagen weitgehend aufgetrocknet. Das Carbopol war in den Stein gewandert. Dennoch wurden die Flächen regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand nach der Kompressenbehandlung und Nachreinigung. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 19
PP- Folie zweischichtig
Reiner Puffer
Applikation 6 Tage
Probefläche 19 wurde an der Mauerkrone in östlicher Ausrichtung angelegt. Der Bereich ist durch Abplatzungen und mikrobiellen Bewuchs gekennzeichnet.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis markiert.

Zwischenzustand
In der Aufnahme ist die Probefläche im Zwischenzustand mit aufgebrachter Kompresse aus zweischichtiger PP- Folie mit einer Lösung aus Puffer und Medium ohne Bakterienzugabe zu sehen. Die Testflächen waren während des Versuchs täglich intensiver Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Die Flächen wurden regelmäßig nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Eine optische Veränderung wurde durch den Kompressenauftrag nicht erzeugt. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 20
PP- Folie dreischichtig
Reiner Puffer
Applikation 6 Tage
Probefläche 20 wurde in östlicher Ausrichtung an der Mauerkrone aufgebracht. Die Oberfläche wirkt sehr unruhig und ist durch kleine Abplatzungen gekennzeichnet.
Die roten Punktmarkierungen bezeichnen die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis.

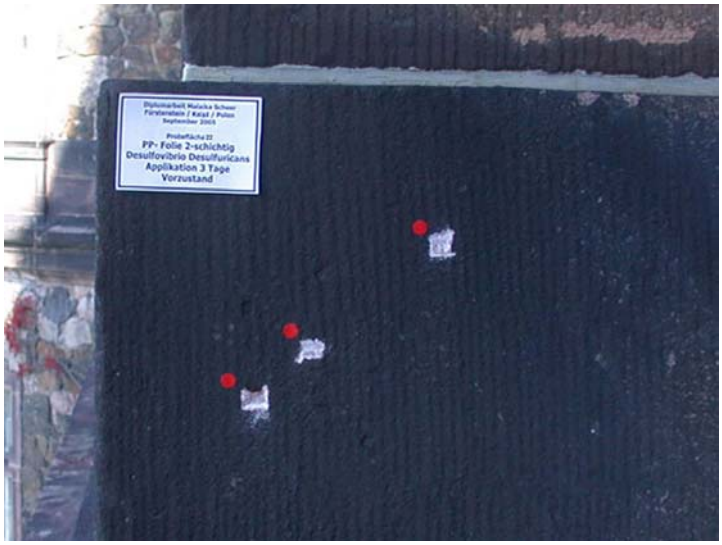
Zwischenzustand
Die Kompresse der Testfläche 20 bestand aus einem dreischichtigen PP- Foliensystem, das mit einer Lösung aus Puffer und Medium ohne Bakterienzugabe getränkt wurde. Die Flächen wurden regelmäßig mit der gleichen Lösung nachgenässt.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Auch an den Testflächen mit reiner Puffer- Medium-Kompresse wurden nach der Behandlung erneut Proben genommen. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung gekennzeichnet.

Vorzustand
Probefläche 21
Carbopol- Kompresse
Reiner Puffer
Applikation 6 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 21 im Vorzustand. Der Bereich weist eine unregelmäßige schwarze Kruste auf.
Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 markiert.

Zwischenzustand
Die Testfläche wurde mit einer Kompresse aus Carbopol versehen. Die Kompresse besteht aus Japanpapier, unbeimpfter Carbopol- Paste, Japanpapier und abdeckender Folie. Die Flächen wurden regelmäßig mit der Puffer-Medium- Mischung nachgenässt.

Endzustand
Im Endzustand präsentiert sich die Oberfläche der Testfläche ohne optische Veränderungen. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung gekennzeichnet.

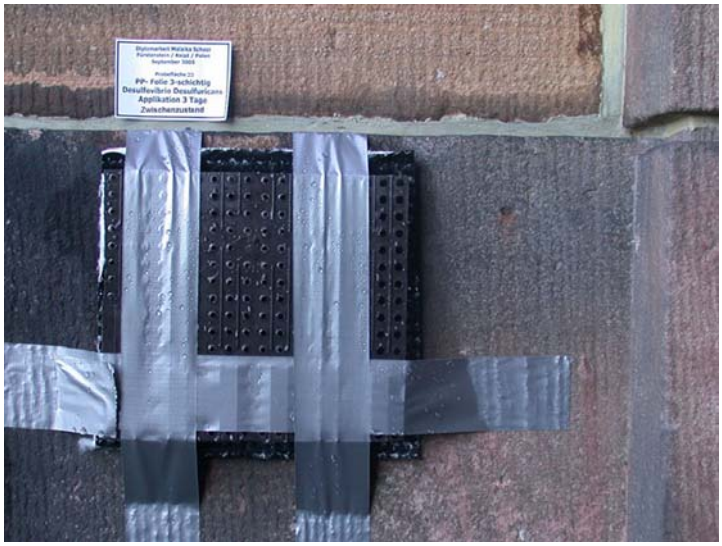


Vorzustand Roter Sandstein
Probefläche 22
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 3 Tage
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 22 auf rotem Sandstein der Westfassade des Schlosses im Vorzustand. Der Bereich ist durch starke Verkrustungen gekennzeichnet.
Die roten Punktmarkierungen bezeichnen die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis

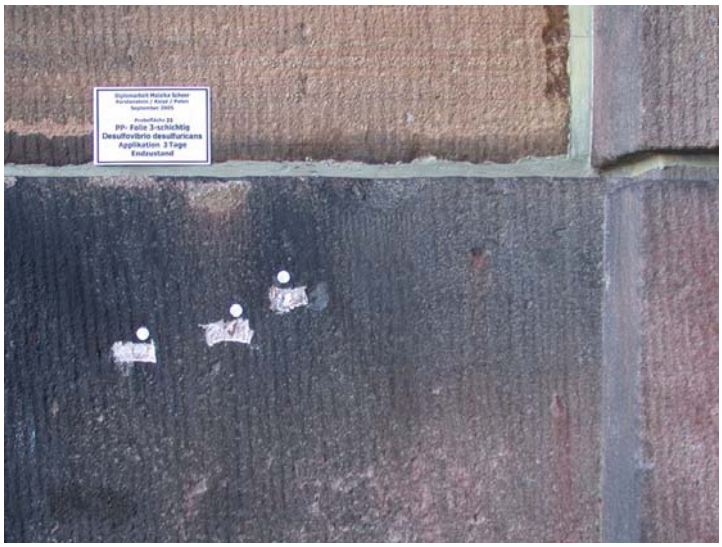
Zwischenzustand
Die Testfläche wurde mit einer Kompresse aus zweischichtiger PP- Folie versehen, die mit Hilfe einer Matte und Gewebeband auf der Oberfläche fixiert wurde. Das Vlies wurde mit einer D. desulfuricans- Suspension durchnässt und morgens und abends nachgefeuchtet.

Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Die Kompresse erzeugte keine optische Veränderung, Reste des Gewebebandes verblieben auf der Oberfläche. Mit den weißen Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen nach der Kompressenbehandlung von links nach rechts 1-3 gekennzeichnet.

Vorzustand Roter Sandstein
Probefläche 23
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 3 Tage
In der Aufnahme ist die Probefläche 23 im Vorzustand zu sehen. Sie befindet sich ebenfalls auf rotem Sandstein an der Westfassade des Schlosse. Mit den roten Punkt-markierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis gekennzeichnet.



Zwischenzustand
Die Probefläche wurde mit einer Kompresse aus dreischichtiger PP- Folie versehen, die mit Desulfuricans- Lösung getränkt wurde. Die Kompresse wurde mittels Gewebeband und einer Schutzmatte für die Fixierung befestigt. Die Oberfläche der Kompresse wurde regelmäßig durch Besprühen nachgenässt.



Endzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Endzustand. Eine optische Veränderung nach der Kompressenbehandlung war nicht erkennbar. Die weißen Punktmarkierungen markieren die Probeentnahmestellen des Endzustandes. Sie befinden sich in direktem Anschluss an die Vorzustandsproben.

Vorzustand Roter Sandstein
Probefläche 24
Carbopol- Kompresse
Desulfovibrio desulfuricans
Applikation 3 Tage
Probefläche 24 wurde auf rotem Sandstein an einem Balkon der Westfassade angelegt. Mit den roten Punktmarkierungen sind die Probeentnahmestellen für den quantitativen Gipsnachweis von links nach rechts 1 – 3 gekennzeichnet.

Zwischenzustand
Die Aufnahme zeigt die Probefläche im Zwischenzustand mit Carbopol- Kompresse. Die Testfläche wurde mit einer Schutzfolie abgedeckt, um die schnelle Abtrocknung zu unterbinden. Die Flächen wurden regelmäßig mit Bakterien-suspension nachgenässt.

Endzustand
Nach der Kompressen-behandlung wurden erneut drei Krustenproben im unmittelbaren Anschluss zu den Vorzustands-proben genommen. Sie sind durch weiße Punktmarkierungen oberhalb der Entnahmestellen gekennzeichnet. Eine Aufhellung oder Reduzierung der Krusten wurde nicht beobachtet.

Fotodokumentation IV

Durchführung der mikrobiellen Salzreduzierung im Nordparadies des Hildesheimer Domes

In der Fotodokumentation werden die Vor-, Zwischen- und Endzustände der im Nordparadies des Hildesheimer Domes durchgeführten bakteriellen Entsalzung dargestellt. Die UV- Aufnahmen der Kompressensysteme / -Folien nach deren Abnahme und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter Proben der Vor- und Endzustände sind ebenfalls aufgeführt.

Im Nordparadies sind hauptsächlich Siltsandstein, Flasersandstein und der regionstypische Mittel- Rhäthauptsandstein verbaut worden. Für die Testflächen wurde ein Bereich an der Westwand des Nordparadieses im Innenraum unterhalb einer Fensteröffnung gewählt.

Übersicht der Probeflächen an der Westwand des Nordparadieses, Hildesheimer Dom

Der Bereich ist durch starke Krustenbildung gekennzeichnet, mit der ein massives Abschalen der Oberflächen einhergeht. Partiell sind weiße Salzrasen auf der Oberfläche erkennbar. Die Originaloberfläche ist bereits in großen Bereichen abgängig. Daher war eine umfangreiche Probennahme aus den locker aufliegenden Krustenbereichen möglich.

Bei der Versuchsdurchführung kamen drei verschiedene Kompressensysteme zum Einsatz: eine zweischichtige Polypropylen- Folie, eine dreischichtige Polypropylen- Folie sowie eine Carbopol- Paste.

Die Kompressenfolien wurden mit Gewebeband auf den Steinoberflächen fixiert. Da die Bereiche stark sandeten, wurden zusätzlich Metallböcke gegen die Matten gelehnt.
Insgesamt wurden 9 Probeflächen angelegt: die drei Kompressensysteme wurden je mit beiden Desulfovibrio- Arten hergestellt (Probefläche 1-6). Die Probeflächen 7 und 8 wurden jeweils mit unbeimpfter Puffer- Medium- Mischung im Verhältnis 4:1 hergestellt und als Carbopol- Kompresse sowie dreischichtige PP- Folie appliziert. Darüber hinaus wurde eine Ammoniumcarbonat- Kompresse mit Arbocel als Trägermaterial und gesättigter Ammoniumcarbonat- Lösung angesetzt und aufgetragen(Probefläche 9).

Probefläche Nr	Foliensystem	Bakterienlösung	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
3	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
4	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
5	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
6	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
7	Carbopol	unbeimpft	Sandstein	3 Tage
8	PP- Folie 3- schichtig	unbeimpft	Sandstein	3 Tage
9	Arbocel	Ammoniumcarbonat	Sandstein	3 Tage

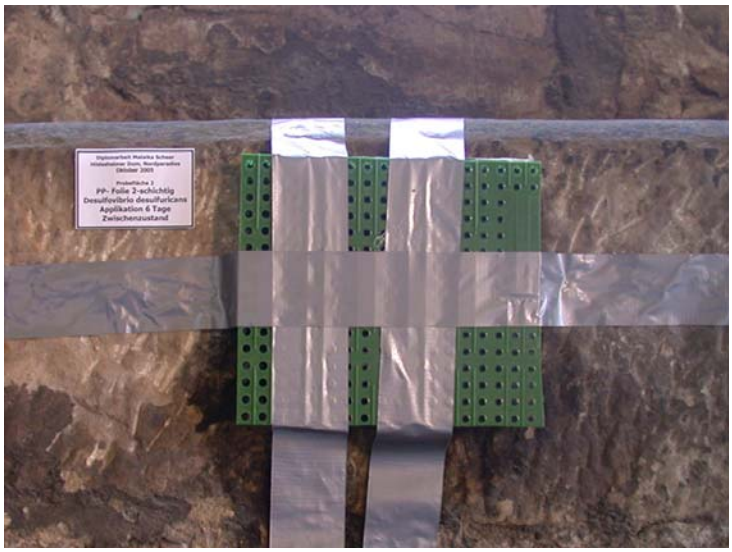
Tabelle Probeflächen und applizierte Kompressensysteme

Die Kompressen verblieben drei Tage auf den Oberflächen und wurden aufgrund der niedrigen Temperaturen nachts mit Wärmequellen bestrahlt.
Die Dokumentation der Vor-, Zwischen- und Endzustände ist für jede Probefläche einzeln aufgeführt: die erste Seite zeigt den Vor- und Zwischenzustand sowie die Steinoberflächen nach dreitägiger Applikation. Dabei stellt die Aufnahme des Vorzustandes die zu beprobende Fläche vor der Probennahme und Applikation der Kompressen dar. Die Zwischenzustandsaufnahme dokumentiert die Art der aufgebrachten Kompresse und Methode der Fixierung auf der Oberfläche. Dabei unterscheiden sich die Probeflächen mit zweifacher PP- Folie nicht von denen mit dreifacher PP- Folie. Der Unterschied der Folien ist lediglich von der Vorderseite der Kompresse aus erkennbar. Die dritte Aufnahme dokumentiert den Endzustand der Probeflächen nach drei Tagen. Nach der Probennahme wurden die Kompressen erneut auf die Oberflächen aufgebracht und dort erneut für drei Tage bei regelmäßigem Nachfeuchten belassen.
Auf der zweiten Seite dokumentiert die zweite Endzustandsaufnahme den Zustand der behandelten Objektoberflächen vier Tage nach Abnahme der Kompressen. Die Oberflächen der PP- Folien- Kompressen ließen eine Nachreinigung nicht notwendig erscheinen. Die Oberflächen der mit Carbopol behandelten Bereiche wurden vorsichtig mit aqua dest. und Pinsel nachgereinigt. Bei Probefläche 1 und 6 wurden Mirowskimessungen durchgeführt,

deren Durchführung ebenfalls fotografisch dokumentiert wurde.Die letzte Aufnahme zeigt die gereinigten Objektbereiche zwei Wochen nach Versuchsende. Dabei wird der etwaige Reinigungserfolg aufgezeigt. Auf der Folgeseite sind dann die REM- Aufnahmen des Vorzustandes (bei Probefläche 1 und 5) sowie des Endzustandes (bei Probefläche 1 bis 5) dargestellt.
Alle UV- Aufnahmen wurden bei 400facher Vergrößerung hergestellt.

Probefläche 1 Vorzustand

PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 1 an der Westwand des Nordparadieses. Die Proben des Vorzustandes wurden mittels Skalpell entnommen und sind in der Aufnahme durch rote Punktmarkierungen gekennzeichnet.
Die Oberflächen sind durch starke Verkrustungen gekennzeichnet.



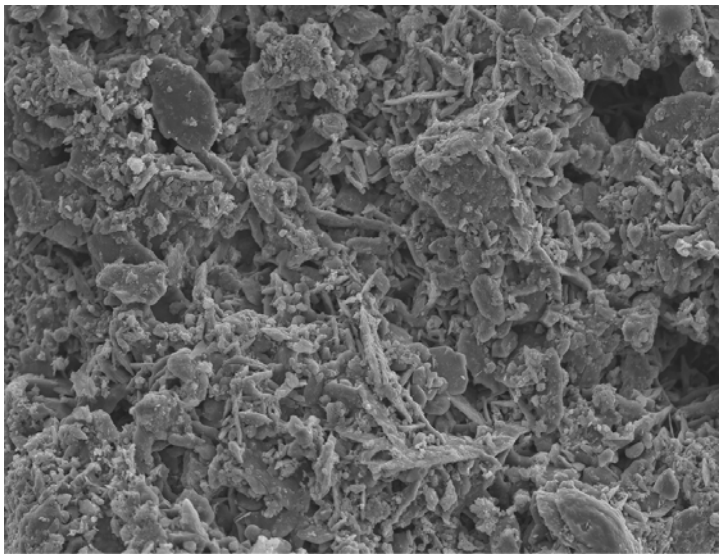
Zwischenzustand
Nach der Probennahme wurde ein Kompressensystem aus zweischichtiger PP- Folie deckend über alle drei Probeentnamestellen aufgebracht. Die Kompresse wurde zur besseren Haftung mit einer Plastikmatte abgedeckt und mit Gewebeband fixiert.
Die Folie wurde mit Bakterien der Desulfovibrio vulgaris- Art beimpft und täglich zweimal nachgefeuchtet.

Endzustand nach 3 Tagen
Nach drei Tagen wurden die Kompressen von den Objektoberflächen entfernt. Mittels Skalpell wurde aus jeder Probefläche eine Oberflächenprobe im Anschlussbereich an die Vorzustandsprobe entnommen und verpackt. Die Oberflächen zeigten zu diesem Zeitpunkt keinen Reinigungserfolg.

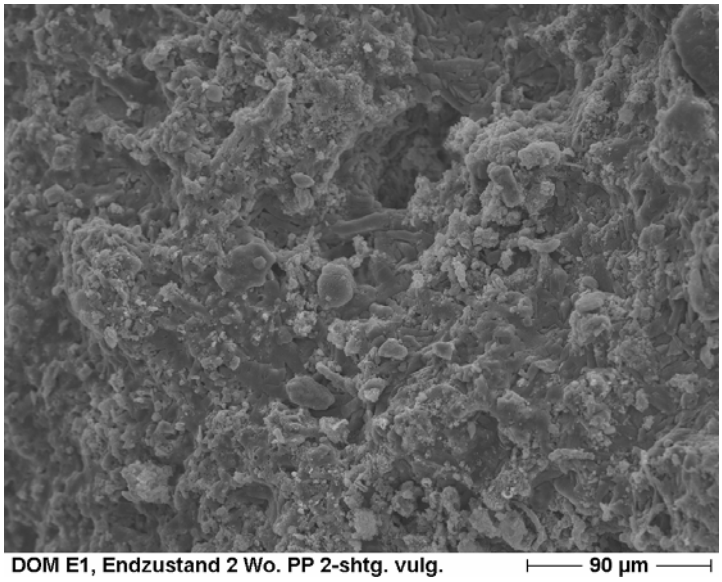
Endzustand nach vier Tagen
Bei einer Objektsichtung nach vier Tagen war ein leichter Reinigungserfolg an der Ober-fläche zu erkennen. Sie erschien deutlich heller. Darauf-hin wurden an zwei ausge-wählten Objektbereichen Mirow-skimessungen durchgeführt.

Mirowskimessung
Die Aufnahme zeigt die Mirowskimessung in Probe-fläche 1. Die linke Messung wurde mit aqua dest, die rechte mit Schellsol D 40 durchgeführt. Deutlich sind die feuchten Bereiche an den Stein-oberflächen im Bereich des Schwämmchens erkennbar. Die Ausdehnung zeigt, dass die Oberflächen verdichtet sind, die Messung dauerte 90 Minuten.

nach 2 Wochen
Der Reinigungserfolg der Folienkompressen mit Bakterienlösung war auch zwei Wochen nach Abnahme noch deutlich erkennbar. Eine Veränderung innerhalb der zwei Wochen war nicht erfolgt.



REM- Aufnahme des Vorzustandes, Probefläche 1
In der Aufnahme wird die unruhige Struktur der Steinoberfläche deutlich. Weiterhin sind die unterschiedlichen Erscheinungsformen des Gipses von nadelig, fädig über plättchenartig erkennbar.



REM- Aufnahme des Endzustandes, Probefläche 1
Die REM- Aufnahme zeigt nach der Behandlung mit der Bakterien- Kompresse keine wesentlichen Veränderungen. Bakterien sind nicht erkennbar, ebenso keine anderen Organismen. Die Oberfläche erscheint etwas geschlossener.

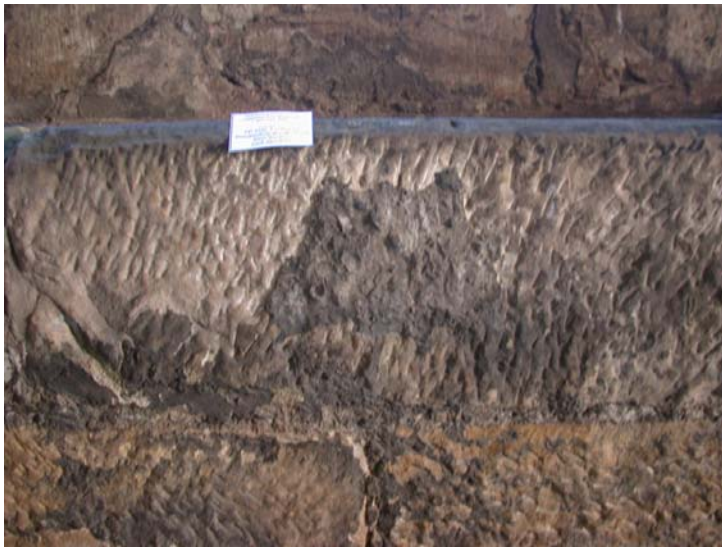
Probefläche 2 Vorzustand
PP- Folie zweischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
In Probefläche 2 wurden ebenfalls drei Vorzustandproben mit dem Skalpell genommen und mit roten Punktmarkierungen gekennzeichnet. Die auf dem Stein liegende Kruste ist etwa 2 mm dick und in weiten Bereichen bereits abgängig.

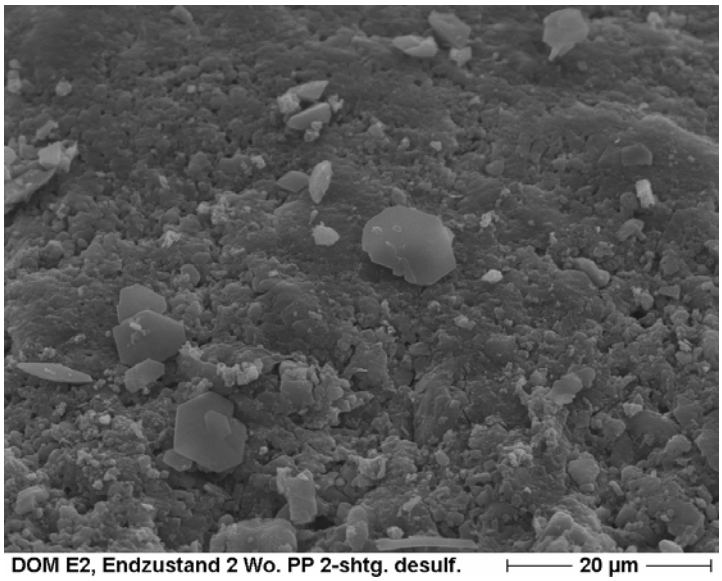
Zwischenzustand
Die Probefläche wurde mit einer zweischichtigen PP- Folie, die mit Bakterien der Desulfovibrio desulfuricans- Kultur beimpft war, versehen. Zur Abdeckung wurde eine Matte aufgelegt, die mit Gewebeband an der Steinoberfläche befestigt wurde. Die Probefläche wurde zweimal täglich mit Bakterienlösung nachgefeuchtet.

Endzustand nach 3 Tagen
Nach drei Tagen wurde die Kompresse von der Objektoberfläche entfernt. Wiederum wurden drei Krustenproben mit dem Skalpell entnommen, die in der Aufnahme durch gelbe Punktmarkierungen gekennzeichnet sind. Die Oberflächen zeigten zum Zeitpunkt der Abnahme der Kompressen keinen Unterschied zum Vorzustand.

Endzustand nach vier Tagen
Nach vier Tagen zeigte die Probefläche einen leichten Reinigungserfolg. Der behandelte Bereich erschien im Vergleich zum umliegenden Krustenmaterial etwas heller, die Dicke der Kruste hatte jedoch nicht abgenommen.

Nach 2 Wochen
Auch nach zwei Wochen war der Reinigungserfolg der Folienkompresse mit den Bakterien weiterhin erkennbar. Durch die hellere Farbigkeit hob sich der behandelte Bereich deutlich von dem umgebenden, deutlich schwärzeren Krusten-bereichen ab.





REM- Aufnahme des Endzustandes, Probefläche 2
Die Aufnahme zeigt die Probefläche 2 im REM. Die Oberfläche erscheint weitgehend geschlossen, lediglich kleinere scheibchenartige Gipspartikel liegen auf. Bakterien sind nicht erkennbar.

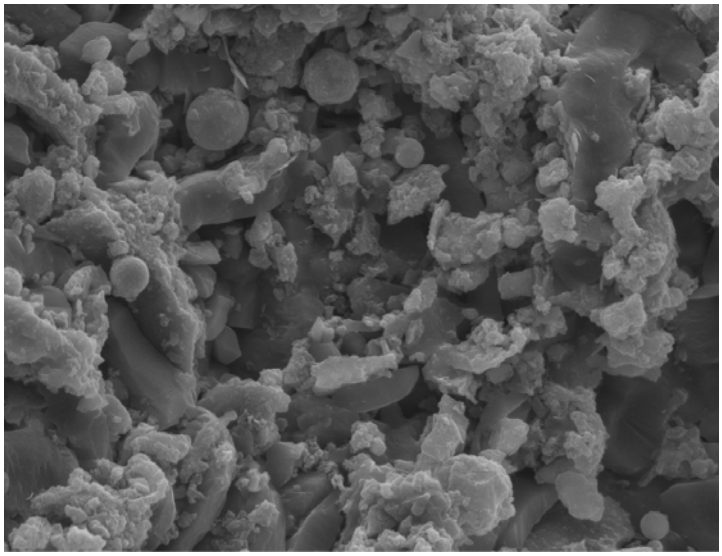
Probefläche 3 Vorzustand
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio vulgaris
Für die Probefläche 3 wurde ein etwas weniger stark verkrusteter Bereich an der Westwand des Paradieses am Hildesheimer Dom ausgewählt. Auch hier wurden mit dem Skalpell drei Oberflächenkrustenproben genommen und für den quantitativen Gipsnachweis verpackt. Die Oberfläche erscheint durch das starke Relief sehr unregelmäßig verschwärzt.

Zwischenzustand
Nach der Probennahme wurde ein Kompressensystem aus einer dreischichtigen PP- Folie aufgebracht, die mithilfe einer aufliegenden Plastikmatte und Gewebeband in Position gehalten wurde. Das Folienvlies wurde mit Bakterienlösung der Vulgaris- Art eingesprüht und regelmäßig nachgefeuchtet.

Endzustand nach 3 Tagen
Nach drei Tagen wurde die Kompresse von der Objektoberfläche entfernt. Mittels Skalpell wurden aus der Probefläche drei Oberflächenproben im Anschlussbereich an die Vorzustandsprobe entnommen und verpackt. Die Oberflächen zeigten zu diesem Zeitpunkt keinen Reinigungserfolg.

Endzustand nach vier Tagen
Auch in der Probefläche 3 zeigte sich vier Tage nach Abnahme der Kompresse ein leichter Reinigungserfolg, der sich in Form leichter Aufhellung präsentierte. Eine Reduzierung der Schichtdicke der Krusten-auflagen konnte jedoch nicht beobachtet werden.

nach zwei Wochen
In Probefläche 3 war auch zwei Wochen nach Abnahme der Kompressen nur ein leichter Reinigungserfolg erkennbar, der in der Übersichtsaufnahme dargestellt ist.



REM- Aufnahme des Endzustandes, Probefläche 3
Auch die REM- Aufnahme der Probefläche 3 nach der Behandlung unterscheidet sich kaum von den übrigen Oberflächen. Partiell sind Eier anderer Mikroorganismen als runde Partikel erkennbar. Deutlich wird die unregelmäßige Struktur der Oberfläche: einige Bereiche erscheinen fast glatt, während in anderen sehr unregelmäßige Ausblühungen vorliegen.

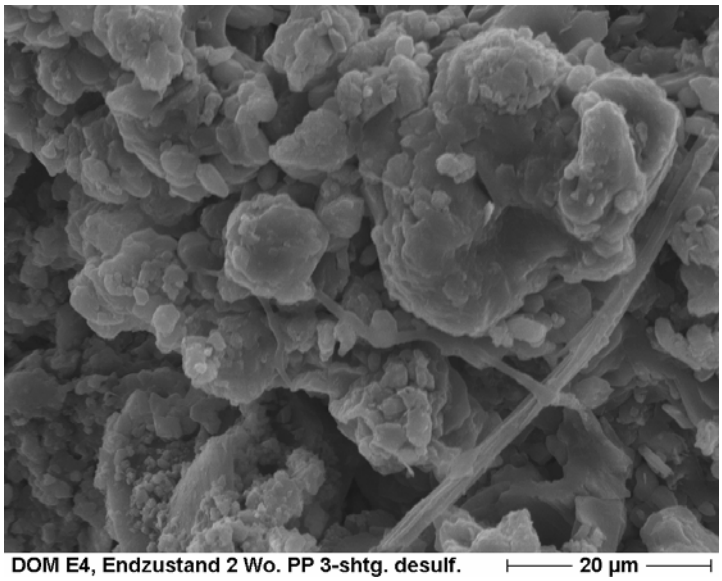
Probefläche 4 Vorzustand
PP- Folie dreischichtig
Desulfovibrio desulfuricans
Für die Probefläche 4 wurde ein stark verkrusteter Bereich ausgewählt. Es wurden drei Krustenproben mit dem Skalpell entnommen und für die Vorzustandsaufnahme mit roten Punktmarkierungen gekennzeichnet. Die Kruste erscheint als etwa 2 mm dicke aufliegende, stark am Stein haftende Auflage.

Zwischenzustand
Die Oberfläche der Probefläche 4 wurde entsprechend der Probefläche 3 mit einer dreischichtigen PP- Folie versehen, die jedoch in diesem Fall mit Desulfuricans- Bakterien beimpft war. Zur Stabilisierung und Fixierung auf der Oberfläche wurde eine Plastikmatte aufgebracht, die mit Gewebeband in Position gehalten wurde. Die Probefläche wurde während der Versuchsdauer morgens und abends nachgenässt.

Endzustand nach 3 Tagen
Nach Versuchsende wurde die Kompresse von der Oberfläche abgenommen. Im unmittelbaren Anschluss zu den Vorzustandsproben wurden erneut drei Krustenproben für den quantitativen Gipsnachweis entnommen und für die Aufnahme mit gelben Punktmarkierungen gekennzeichnet. Eine optische Verbesserung gegenüber dem Vorzustand war nicht erkennbar.

Endzustand nach vier Tagen
Vier Tage später zeigte sich auch in Probefläche 4 ein leichter Reinigungserfolg, der jedoch deutlich geringer als bei den anderen Probeflächen ausfiel. Es war eine leichte Aufhellung der behandelten Fläche gegenüber dem umgebenden Steinmaterial erkennbar.

Nach zwei Wochen
Die Oberfläche der Probefläche 4 präsentierte sich auch nach zwei Wochen unverändert mit einem leichten Reinigungs-erfolg.



REM- Aufnahme des Endzustandes, Probefläche 4
Die Aufnahme zeigt wiederum ein anderes Erscheinungsbild der Gipskruste. Hier erscheint die Kruste blumenkohlartig mit einem stark ausgeprägten Relief. Rechts im Bild ist eine Pilzhyphe zu sehen.

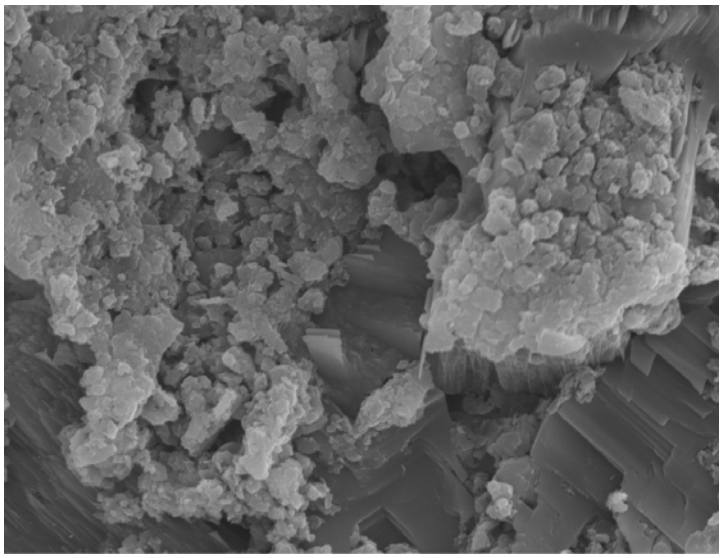
Probefläche 5 Vorzustand
Kompresse Carbopol
Desulfovibrio vulgaris
Die Probefläche 5 präsentiert sich im Vorzustand mit einer weitgehend gleichmäßigen grauschwarzen Kruste. In drei Bereichen wurden mit dem Skalpell Proben für den quantitativen Gipsnachweis entnommen und mit roten Punktmarkierungen gekenn-zeichnet.

Zwischenzustand
Eine Lage Zellstoff wurde durch Befeuchtung mit Bakterien-suspension auf der Oberfläche fixiert. Auf diese wurde die mit Vulgaris- Bakterienlösung hergestellte Carbopolpaste aufgespachtelt. Anschließend wurde als Feuchtespeicher erneut eine Lage Japanpapier aufgelegt und angedrückt. Gegen die schnelle Verdun-stung wurde abschließend eine PE- Folie aufgelegt und mit Gewebeband fixiert. Die Probefläche wurde ebenfalls zweimal täglich nachgefeuchtet.

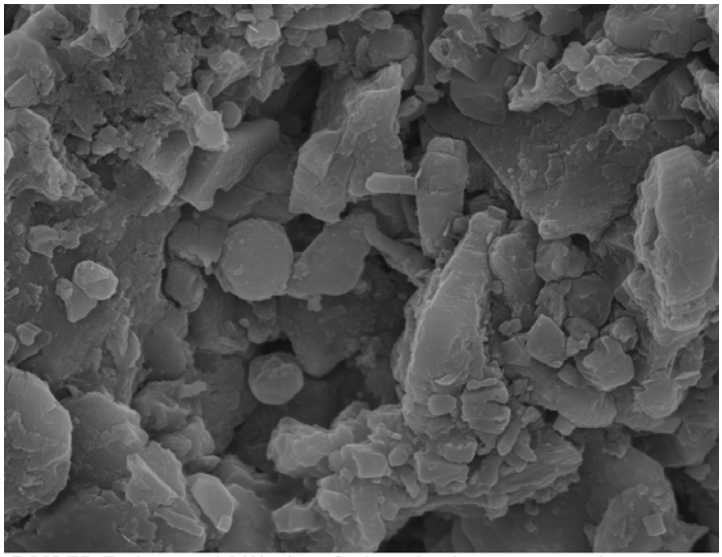
Endzustand nach 3 Tagen
Auch die Carbopol- Kompresse wurde nach drei Tagen von der Oberfläche entfernt. Es war zu einer starken Farbvertiefung gekommen. Die drei Endzu-standsproben wurden mit Skalpell entnommen und für die weitere Verarbeitung verpackt. Die Probennahmestellen wurden für die Aufnahme mit gelben Punktmarkierungen gekennzeichnet. Die Oberfläche wurde mit aqua dest. und Pinsel nachgereinigt.

Endzustand nach vier Tagen
Vier Tage nach Abnahme der Kompresse zeigte der behandelte Bereich eine deutliche Aufhellung. Reste des Carbopols waren nicht erkennbar. Das Reinigungs-ergebnis war erheblich besser als bei den PP- Folien.

nach zwei Wochen
Auch nach zwei Wochen zeigten die gereinigten Objekt-bereiche unverändert eine Aufhellung. Eine weitere Nachbehandlung erschien nicht notwendig.



REM- Aufnahme des Vorzustandes, Probefläche 5
Die Aufnahme der Probenoberfläche zeigt wiederum die unterschiedlichen Erscheinungsformen des Gipses im Vorzustand. Im unteren Bereich wird der schichtige Charakter deutlich, während die helleren Partien oben im Bild deutlich unregelmäßiger und unruhiger erscheinen.



REM- Aufnahme des Endzustandes, Probefläche 5
Die REM- Aufnahme zeigt einen Probenbereich nach der Behandlung mit Carbopol. Im Vergleich zum Vorzustand wird deutlich, dass die helleren Bereiche weitgehend verschwunden sind. Reste der Oberflächenbehandlungen sind nicht erkennbar. Das Material erscheint schieferartig geschichtet.

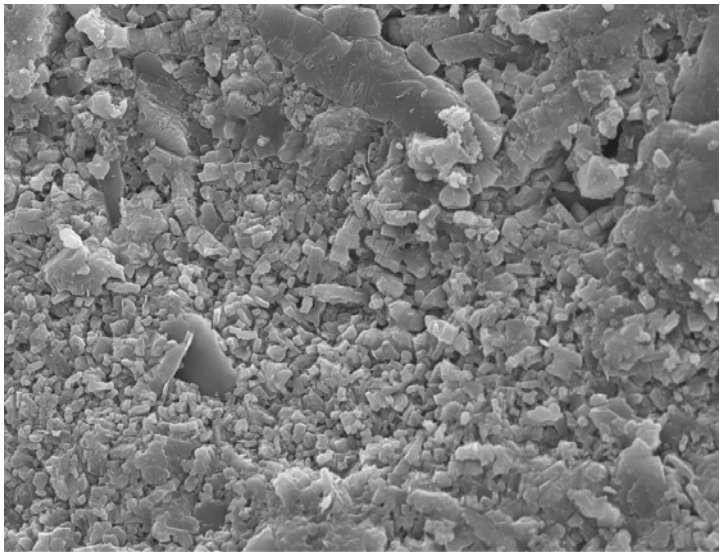
Probefläche 6 Vorzustand
Kompresse Carbopol
Desulfovibrio desulfuricans
Probefläche 6 wurde ebenfalls an der Westwand des Nordparadieses angelegt. Vor der Maßnahme wurden drei Krustenproben entnommen und für die Aufnahme mit roten Punktmarkierungen gekennzeichnet. Die Oberfläche ist gleichmäßig mit einer dicken harten Schicht überzogen, die in kleinen Bereichen bereits abgeplatzt ist.

Zwischenzustand
Entsprechend zu Befundstelle 5 wurde die Probefläche 6 mit einer Carbopol- Kompresse versehen, die mit der Bakterienlösung des Bakteriums Desulfovibrio desulfuricans hergestellt wurde. Die Masse wurde gleichmäßig auf eine Lage Japanpapier aufgespachtelt und mit Japanpapier und PE- Folie abgedeckt. Die Probefläche wurde zweimal täglich mit Bakterienlösung nachgefeuchtet.

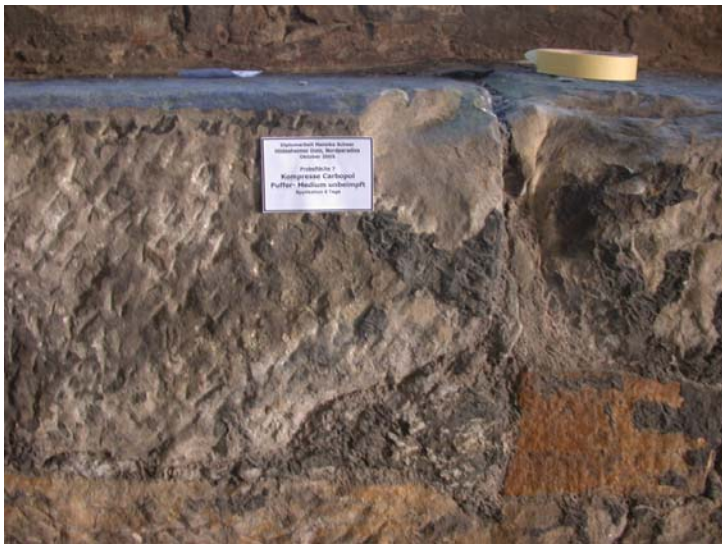
Endzustand nach 3 Tagen
Nach Abnahme der Kompresse nach drei Tagen präsentierte sich die Oberfläche aufgrund der starken Durchfeuchtung deutlich dunkler als zuvor. Unterschiede in der Krustendicke traten deutlicher in Erscheinung. Es wurden wiederum drei Krustenproben für den quantitativen Gipsnachweis entnommen. Die Oberfläche wurde mit aqua dest und Pinsel nachgereinigt.

Endzustand nach vier Tagen
Auch die Probefläche 6 zeigte nach vier Tagen einen deutlichen Reinigungserfolg. Die gereinigte Oberfläche erschien deutlich heller und hob sich farblich von dem umgebenden Steinmaterial ab. Es erschien sinnvoll, die Verdichtung der Oberfläche aufgrund des Carbopol- Eintrages mit einer Mirowskimessung zu überprüfen.
Auch nach zwei Wochen war der Reinigungserfolg unverändert erkennbar.

Mirowskimessung
Bei der Mirowskimessung wurde die aqua dest.- und die Schellsol D 40- Aufnahme innerhalb der Probefläche überprüft. Die Aufnahme zeigt links mit der roten Skala die Schellsol- und rechts mit der blauen Skala die Wasseraufnahme. Der Durchmesser der Feuchtestellen im Bereich der Schwämmchen deutet auf eine starke Verdichtung der Oberflächen hin, die jedoch bei der unbehandelten Oberfläche ähnlich ausfällt.



REM- Aufnahme des Endzustandes, Probefläche 6
Die REM- Aufnahme der Probefläche 6 zeigt im Endzustand ebenfalls keine Reste des Carbopols. Die Oberfläche erscheint sehr kleinteilig mit zahlreichen aufliegenden Partikeln. Bakterien konnten nicht nachgewiesen werden. Die Aufnahme verdeutlicht die Zusammen-setzung aus unterschiedlichsten Partikeln. Die Gipspartikel erscheinen hier eckig- kantig.



Probefläche 7 Vorzustand
Kompresse Carbopol
Puffer- Medium- Mischung unbeimpft
Für den Vergleich des Reinigungserfolges wurden 14 Tage nach Abnahme der ersten 6 Kompressen drei weitere aufgebracht. Es sollte überprüft werden, ob das gleiche Reinigungsergebnis auch mit unbeimpften Neutralkompressen erreicht werden kann. Die Aufnahme zeigt die Probefläche 7 im Vorzustand.

Zwischenzustand
Auf die Probefläche 7 wurde eine Carbopol-Kompresse, die mit einem unbeimpften Puffer-Medium- Gemisch hergestellt war, aufgebracht. Das schnelle Eindringen in den Stein wurde durch eine Lage Japanpapier eingeschränkt. Die Kompresse wurde mit Japanpapier und PE- Folie abgedeckt.

Endzustand nach drei Tagen
Nach drei Tagen wurde die Carbopol- Kompresse von der Oberfläche abgenommen. Aus dem Bereich wurde eine Krustenprobe entnommen. Es erfolgte eine leichte Nach-reinigung mit aqua dest., um die Reste des Carbopols von der Oberfläche zu entfernen. Eine optische Veränderung war nicht zu erkennen.

Endzustand nach vier Tagen
Der Bereich mit der unbeimpften Carbopol- Kompresse zeigt vier Tage nach Abnahme der Kompresse einen leichten Reinigungserfolg. Die Krusten schienen etwas heller. Das Reinigungsergebnis ist vergleichbar mit den Bakterienkompressen.

Probefläche 8 Vorzustand
PP- Folie dreischichtig
Puffer- Medium- Mischung
unbeimpft

Die Probefläche 8 wurde im unteren Bereich der Westwand im Bereich der Knappschen Röhrchen angelegt. Die Oberfläche war durch starke Verkrustungen gekennzeichnet. Die Probefläche war etwas kleiner als die vorherigen.

Zwischenzustand

Die Probefläche 8 wurde mit einer dreischichtigen PP-Folie belegt, die mit einem Puffer-Medium- Mischung beimpft war. Die Kompresse wurde mit einer Plastikmatte versehen und mit Gewebeband auf der Oberfläche fixiert. Aufgrund der schlechten Haftung in den stark sandenden Bereichen wurde die Kompresse zusätzlich abgestützt. Sie verblieb drei Tage auf der Oberfläche.

Endzustand nach drei Tagen

Nach Abnahme der Kompresse präsentierte sich die Oberfläche der Probefläche 8 ohne optische Veränderung. Aus dem Bereich wurde eine Krustenprobe für den quantitativen Gipsnachweis entnommen. Eine Nachreinigung erschien nicht erforderlich.

Endzustand nach vier Tagen
Vier Tage nach Abnahme der Kompresse präsentiert sich die Oberfläche mit einer leichten Aufhellung, die vergleichbar zu dem Reinigungsergebnis mit Bakterien erscheint.

Probefläche 9 Vorzustand
Arbocel- Kompresse
Ammoniumcarbonat- Lösung
Für den Vergleich der Biokompresse mit einer klassischen Salzreduzierungs-methode sollte auch eine Probefläche mit einer Arbocel-Kompresse angelegt werden. Für die Kompresse wurde ein stark verkrusteter Bereich unterhalb der Probeflächen 1 und 3 ausgewählt.

Zwischenzustand
Die Kompresse wurde mit gesättigter Ammoniumcarbonat-Lösung und Arbocel hergestellt und auf der Oberfläche appliziert. Um eine schnelle Austrocknung zu unterbinden, wurde die Oberfläche ab-schließend mit einer PE- Folie abgedeckt. Die Kompresse ver-blieb drei Tage auf der Oberfläche.

Endzustand nach drei Tagen
Die Ammoniumcarbonat-Kompresse wurde nach drei Tagen von der Oberfläche entfernt. Sie war vollständig aufgetrocknet. Die Reste des Arbocels wurden mit Pinsel vorsichtig abgebürstet, an-schließend mit aqua dest. nachgewaschen. Reste ver-blieben dennoch als weißer Schleier auf der Oberfläche. Der Bereich erschien deutlich heller und hob sich damit farblich von den umgebenden Krusten ab.

Endzustand nach vier Tagen
Im Bereich der Arbocel-Kompresse sind nach vier Tagen weiterhin Reste des Zellstoffs auf der Oberfläche zu sehen. Auch ein leichter Reinigungserfolg ist erkennbar.

Überimpfung der Kulturen, jeweils mit D. vulgaris und D. desulfuricans

Anzahl	Datum	aus	Mediumfarbigkeit bzw. -zusammensetzung	Zweck der Überimpfung
4*	20.05.	Anzucht	klar	
4	30.05.	20.05.	pink	Kulturerhalt
2	01.06.	30.05.	pink	Kulturerhalt
2	07.06.	01.06.	pink	Kulturerhalt
2	09.06.	30.05.	pink	Kulturerhalt
Flaschen	09.06.	30.05.	pink	Kulturerhalt
2	15.06.	30.05.	klar	Einfluss Mediumfarbigkeit
2	15.06.	30.05.	pink	Einfluss Mediumfarbigkeit
2	27.06.	30.05.	klar	Kulturerhalt
2	15.07.	27.06.	klar	Kulturerhalt
6	19.07.	15.07.	klar	Kulturerhalt
2	26.07.	15.06(D),15.07.(V)	klar	Kulturerhalt
4	29.07.	26.07.	klar	Kulturerhalt
2	09.08.	26.07.	klar	Gipswirkung
2	10.08.	26.07.	klar + Gips	Gipswirkung
2	15.08.	10.08.	30 ml Puffer, 10 ml Kultur	Lebensdauer in Puffer/Medium
1	17.08.	09.08.	V+D zusammen	Wachstum gemeinsam
2 Flaschen	18.08.	10.08.	klar	Vergleich Flasche / Kolben
2	18.08.	10.08.	klar	Vergleich Flasche / Kolben
2	21.08.	15.08.	pink	Kulturerhalt
2	31.08.	18.08. klein	klar	Kulturerhalt
2	01.09.	21.08.	30 ml Puffer, 5 ml Kultur +Gips	Gipswirkung
2	01.09.	21.08.	30 ml Puffer, 5 ml Kultur	Gipswirkung
2	01.09.	21.08.	40 ml Puffer, 2 ml SRB zentrifugiert + Gips	Gipswirkung
2	01.09.	21.08.	40 ml Puffer, 2 ml SRB zentrifugiert	Gipswirkung
2 Flaschen	03.09.	21.08.	pink	Applikation
4 Flaschen	05.09.	31.08.	klar	Applikation
1 Flasche	05.09.	18.08. klein	V+D zusammen	Applikation
2 Flaschen	05.09.	03.09.	klar	Applikation
2	05.09.	31.08.	klar	Kulturerhalt
2 Flaschen	08.09.	03.09.	pink	Applikation
2	08.09.	03.09.	pink	Kulturerhalt
2	19.09.	08.09.	pink	Kulturerhalt
2	05.10.	19.09.	pink	Kulturerhalt
2 Flaschen	13.10.	05.09. (31 + 03)	pink	Applikation
6	13.10.	05.10.	pink	Applikation
2	15.10.	19.09.	klar	Kulturerhalt
4	17.10.	08.09.	klar	Applikation
2	18.11.	15.10.	pink	Kulturerhalt

*soweit nur mit Anzahl gekennzeichnet, handelt es sich um Medium in Erlenmeyer- Kolben

Überprüfung der Vitalität und Aktivität der Bakterien in Kulturen

Anzucht	Datum	Zelldichte V	Bewegung V	grüne Fl.	Zelldichte D	Bewegung D	grüne Fl.
20.05.	24.05.	gering	hoch		gering	hoch	
	27.05.	gering	hoch		gering	hoch	
	01.06.	hoch	mittel		hoch	mittel	
30.05.	01.06.	gering	kaum		gering	kaum	
	09.06.	hoch	kaum		hoch	kaum	
	15.06.	hoch	keine		hoch	keine	
	21.06.	hoch	keine		hoch	keine	
01.06.	09.06.	mittel	mittel		mittel	mittel	
	15.06.	hoch	kaum		hoch	kaum	
	21.06.	hoch	keine		hoch	keine	
07.06.	09.06.	gering	mittel		gering	mittel	
	15.06.	mittel	minimal		mittel	keine	
	21.06.	hoch	keine		hoch	keine	
	07.07.	hoch	keine	50	hoch	keine	70
	14.07.	sehr hoch	keine	30-40	hoch	keine	50
09.06.	15.06.	gering	minimal		gering	keine	
	21.06.	hoch	hoch		hoch	kaum	
	14.07.	sehr hoch	keine	10	sehr hoch	keine	60
15.06.	07.07.	mittel	keine	40	hoch	keine	40-50
klar	14.07.	mittel	keine	30	hoch	keine	40-50
	26.07.	hoch	keine	<10	hoch	keine	80
	28.07.	sehr hoch	keine	<10	sehr hoch	keine	80
	29.07.	sehr hoch	keine	<10	sehr hoch	keine	80
15.06.	07.07.	hoch	keine	40-50	hoch	keine	100
pink	14.07.	mittel bis hoch	keine	40-50	hoch	keine	100
	26.07.	hoch	keine	0	hoch	keine	100
	28.07.	sehr hoch	keine	0	mittel	keine	>70
	29.07.	sehr hoch	keine	0	mittel	keine	70
27.06.	07.07.	mittel	keine	30	hoch	keine	100
	14.07.	mittel	hoch	90-100	hoch	mittel	90-100
	18.07.	sehr hoch	keine	> 80	sehr hoch	keine	> 80
	19.07.	sehr hoch	partiell	80	sehr hoch	partiell	80
15.07.	26.07.	hoch	keine	40-50	gering	keine	0
	29.07.	sehr hoch	keine	50	gering	keine	50
	08.08.	hoch	keine	20	gering	keine	90
19.07.	22.07.	mittel	partiell	>90	mittel	keine	>90
	26.07.	sehr hoch	häufig	50	gering	keine	10
	28.07.	sehr hoch	partiell	10	mittel	partiell	~20
	29.07.	sehr hoch	keine	10	gering	keine	80
	08.08.	hoch	keine	10	gering	keine	50
26.07.	29.07.	mittel	hoch	80	mittel	keine	80
	08.08.	mittel	partiell	50	mittel	keine	50
	11.08.	sehr hoch	keine	10	hoch	keine	90
	15.08.	extrem hoch	keine	10	hoch	keine	90
	17.08.	extrem hoch	keine	~20	mittel	keine	90
	18.08.	extrem hoch	keine	<5	mittel	keine	80
	21.08.	extrem hoch	partiell	10-20	gering	mittel	>90

Anzucht	Datum	Zelldichte V	Bewegung V	grüne Fl.	Zelldichte D	Bewegung D	grüne Fl.
29.07.	08.08.	hoch	partiell	20-30	hoch	keine	0
klar	13.08.	sehr hoch	keine	~20	gering	keine	80
	19.08.	extrem hoch	keine	<20	gering-mittel	keine	>90
	25.08.	extrem hoch	keine	10	mittel	keine	100
29.07.	08.08.	hoch	keine	20-30	gering	keine	100
pink	13.08.	sehr hoch	keine	5-10	gering	keine	80
	18.08.	extrem hoch	keine	0	gering-mittel	keine	80
09.08.	10.08.	hoch	partiell	30	gering	keine	>90
	11.08.	mittel	mittel	30	sehr gering	keine	70-80
	12.08.	mittel	partiell	30	sehr gering	keine	70-80
	13.08.	mittel	stark	70	sehr gering	keine	80
	14.08.	hoch	stark	90	sehr gering	keine	80
	15.08.	hoch	stark	90	sehr gering	keine	70-80
	16.08.	sehr hoch	sehr stark	90	gering	keine	90
	17.08.	sehr hoch	stark	70-80	gering	keine	90
10.08.	11.08.	mittel	keine	10	sehr gering	keine	70-80
+Gips	12.08.	mittel	partiell	50	sehr gering	keine	50
	13.08.	mittel	stark	90	gering	keine	70-80
	14.08.	hoch	stark	90	hoch	mittel	90
	15.08.	hoch	stark	90	hoch	mittel	90
	16.08.	sehr hoch	stark	90	sehr hoch	mittel	95
	17.08.	sehr hoch	stark	90	sehr hoch	stark	90
15.08.	16.08.	mittel	mittel	80	sehr hoch	mittel	80
30 ml P+ 10 ml M	17.08.	hoch	mittel-stark	90	sehr hoch	mittel-stark	90
+Gips	18.08.	hoch	partiell	90	sehr hoch	mittel	90
	19.08.	sehr hoch	stark	100	sehr hoch	stark	100
	20.08.	sehr hoch	mittel	>95	sehr hoch	mittel	>95
	21.08.	sehr hoch	mittel	100	sehr hoch	mittel	>95
	25.08.	extrem hoch	stark	95-100	extrem hoch	mittel-stark	95-100
	30.08.	extrem hoch	mittel-stark	95-100	sehr hoch	mittel	80-90
	02.09.	sehr hoch	stark	100	sehr hoch	mittel	100
	05.09.	sehr hoch	stark	>90	sehr hoch	wenig-mittel	>90
	13.09.	sehr hoch	partiell	100	sehr hoch	partiell	100
17.08.	18.08.	sehr hoch	stark	80	./.	./.	./.
V+D	19.08.	extrem hoch	stark	>90	./.	./.	./.
zusammen	20.08.	extrem hoch	stark	>90	./.	./.	./.
	21.08.	extrem hoch	stark	>80	./.	./.	./.
	25.08.	extrem hoch	stark	100	./.	./.	./.
	30.08.	extrem hoch	sehr stark	80-90	./.	./.	./.
	02.09.	extrem hoch	stark	80-90	./.	./.	./.
	03.09.	extrem hoch	stark	>80	./.	./.	./.
	05.09.	extrem hoch	stark	80	./.	./.	./.
	13.09.	extrem hoch	partiell	100	./.	./.	./.
18.08.	19.08.	mittel	mittel-stark	100	sehr hoch	mittel	90
große Flaschen	20.08.	mittel	stark	100	sehr hoch	stark	>95
	21.08.	mittel	partiell	100	hoch	stark	100
	25.08.	mittel-hoch	keine	95-100	extrem hoch	mittel	95-100
	30.08.	mittel-hoch	wenig-mittel	80	gering-mittel	wenig-mittel	80
	03.09.	sehr hoch	keine	30	./.	./.	./.
	04.09.	extrem hoch	keine	20	./.	./.	./.

Anzucht	Datum	Zelldichte V	Bewegung V	grüne Fl.	Zelldichte D	Bewegung D	grüne Fl.
18.08.	19.08.	gering-mittel	mittel	100	mittel	mittel	100
kleine Kolben	20.08.	gering-mittel	partiell	100	hoch	mittel	90
	21.08.	mittel	mittel	100	hoch	mittel	100
	25.08.	extrem hoch	stark	50	extrem hoch	stark	80-90
	30.08.	extrem hoch	kaum	80	extrem hoch	stark	95
	04.09.	extrem hoch	mittel	70-80	extrem hoch	stark	95
21.08.	25.08.	extrem hoch	mittel	95-100	extrem hoch	stark	100
	30.08.	extrem hoch	mittel	90	extrem hoch	stark	70-80
	02.09.	extrem hoch	stark	80-90	extrem hoch	stark	80-90
31.08.	04.09.	extrem hoch	mittel-stark	100	hoch	sehr stark	100
	05.09.	extrem hoch	stark	100	extrem hoch	stark	100
03.09.	04.09.	mittel-hoch	stark	>80	sehr hoch	mittel-stark	100
Flaschen	05.09.	mittel-hoch	sehr stark	>90	mittel-hoch	sehr stark	100
	06.09.	mittel	stark	100	mittel	partiell	100
	08.09.	extrem hoch	stark	100	extrem hoch	stark	100
	13.09.	hoch-sehr hoch	mittel	100	sehr hoch	stark	95
	15.09.	mittel-hoch	partiell	70-80	extrem hoch	sehr stark	100
05.09.	06.09.	mittel	stark	100	gering	stark	100
Flaschen	08.09.	extrem hoch	stark	100	sehr hoch	stark	100
aus 31.08.	13.09.	sehr hoch	stark	100	mittel-hoch	stark	100
	15.09.	sehr-extrem hoch	mittel	100	sehr hoch	mittel	100
	29.09.	hoch-sehr hoch	stark	95	extrem hoch	mittel	95-100
05.09.	07.09.	extrem hoch	stark	100	extrem hoch	stark	100
aus 31.08.	08.09.	extrem hoch	stark	100	hoch-sehr hoch	stark	100
	13.09.	extrem hoch	mittel	>80	extrem hoch	partiell	100
	15.09.	extrem hoch	partiell	70-80	extrem hoch	partiell	90
	29.09.	extrem hoch	mittel	90	extrem hoch	partiell	90
	06.10.	extrem hoch	mittel	70-80	extrem hoch	mittel	70-80
	12.10.	extrem hoch	stark	70	extrem hoch	stark	80-90
05.09.	06.09.	gering	mittel	100	mittel	mittel	100
Flaschen	08.09.	sehr hoch	stark	100	mittel-hoch	stark	100
aus 03.09.	13.09.	hoch	stark	100	sehr hoch	stark	100
	15.09.	extrem hoch	stark	100	extrem hoch	stark	100
05.09.	08.09.	extrem-super	stark	100	extrem-super	stark	100
aus 03.09.	13.09.	extrem hoch	stark	>80	extrem hoch	stark	100
	16.09.	extrem hoch	partiell	80-90	extrem hoch	mittel	90
	29.09.	extrem hoch	partiell	80	extrem hoch	mittel	60
	06.10.	extrem hoch	partiell	50	extrem hoch	stark	40
	12.10.	extrem hoch	stark	50	extrem hoch	stark	60-70
05.09.	06.09.	mittel-hoch	stark	80-90	./.	./.	./.
V+D	13.09.	hoch	stark	100	./.	./.	./.
	16.09.	extrem hoch	partiell	95	./.	./.	./.
	29.09.	sehr-extrem hoch	stark	80	./.	./.	./.
08.09.	13.09.	sehr hoch	stark	100	sehr-extrem hoch	stark	100
Flaschen	15.09.	extrem hoch	mittel	100	hoch-sehr hoch	sehr stark	100
08.09.	13.09.	sehr hoch	stark	100	mittel-hoch	partiell	100
	16.09.	extrem hoch	stark	100	extrem hoch	stark	100
	29.09.	extrem hoch	partiell	90	extrem hoch	stark	95
	06.10.	extrem hoch	mittel	80	extrem hoch	partiell	>80
	12.10.	extrem hoch	mittel	80	extrem hoch	stark	80-90
	17.10.	extrem hoch	partiell	70-80	extrem hoch	partiell	90

Anzucht	Datum	Zelldichte V	Bewegung V	grüne Fl.	Zelldichte D	Bewegung D	grüne Fl.
09.09.	13.09.	extrem hoch	partiell	100	./.	./.	./.
V+D Flasche	15.09.	gering	keine	60-70	./.	./.	./.
19.09.	29.09.	extrem hoch	mittel	95	extrem hoch	mittel	95
aus 08.09.	06.10.	extrem hoch	partiell	100	sehr hoch	partiell	100
	12.10.	extrem hoch	partiell	90	extrem hoch	mittel	>90
	17.10.	extrem hoch	mittel	70-80	extrem hoch	mittel	90
	18.11.	extrem hoch	mittel	60-70	extrem hoch	mittel	60-70
05.10.	06.10.	mittel	partiell	90	mittel	partiell	100
aus 19.09.	12.10.	extrem hoch	stark	100	extrem hoch	stark	100
13.10. Flaschen	17.10.	mittel	partiell	100	mittel	partiell	90
13.10.	17.10.	hoch	mittel	100	mittel-hoch	stark	100
	18.11.	extrem hoch	stark	70-80	extrem hoch	stark	80-90
15.10.	18.11.	extrem hoch	mittel	80-90	extrem hoch	mittel	80-90
17.10.	18.11.	extrem hoch	mittel	80-90	extrem hoch	stark	80-90

Bewertung der Bakterienvitalität und -aktivität während der Durchführung der Filtration

Durchführung der Filtration am 30.08.2005

Lösung 250 ml	Gegenstand der	250 ml Medium	100 ml Puffer	D. vulgaris
reines Medium	Untersuchung	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
1 Filtrierdurchgang	Lösung	mittel	stark	100
2 Filtrierdurchgänge	Lösung	sehr gering	stark	50
Filter I Rückstand	Filter	super extrem	keine	>80
Filter II in Puffer	Lösung	mittel	mittel	100
Filtrat nach 3 Tagen	Lösung	hoch-sehr hoch	partiell	100
Filtrat nach 7 Tagen	Lösung	mittel	keine	100
Filtrat nach 14 Tagen	Lösung	hoch	mittel	>80

Lösung 100 ml	Gegenstand der	100 ml Medium	5 ml Puffer	D. vulgaris
reines Medium	Untersuchung	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
1 Filtrierdurchgang	Lösung	hoch-sehr hoch	stark	100
2 Filtrierdurchgänge	Lösung	sehr gering	keine	50
Filter I Rückstand	Filter	super extrem	keine	90
Filter II in Puffer	Lösung	super extrem	mittel	>95
Filtrat nach 3 Tagen	Lösung	sehr hoch	keine	10-20
Filtrat nach 7 Tagen	Lösung	super extrem	keine	<5
Filtrat nach 14 Tagen	Lösung	super extrem	partiell	<5

Gewichtsbestimmung und Behandlung der Gipswürfel

Gips-Nr.	Anfangsgewicht	Lösung	Kultur	Versuchsdauer	Endgewicht	Differenz	Gewichtsverlust in M%
1	1,2174	reines Medium	D. desulfuricans	14 Tage	1,1783	0,0391	3,21
2	1,1949	reines Medium	D. desulfuricans	14 Tage	1,0255	0,1694	14,18
3	1,2713	reines Medium	D. vulgaris	14 Tage	1,1355	0,1358	10,68
4	1,3970	reines Medium	D. vulgaris	14 Tage	1,3661	0,0309	2,21
5	0,7971	3 ml P, 1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	0,7117	0,0854	10,71
6	0,7078	3 ml P, 1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	0,6093	0,0985	13,92
7	1,6579	5 ml P,1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	1,6315	0,0264	1,59
8	2,0905	5 ml P,1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	2,0618	0,0287	1,37
9	0,9188	6 ml P, 1 ml M	D. desulfuricans	14 Tage	0,8493	0,0695	7,56
10	0,8946	6 ml P, 1 ml M	D. vulgaris	14 Tage	0,8493	0,0453	5,06
11	0,8163	reiner Puffer	D. desulfuricans	14 Tage	0,7075	0,1088	13,33
12	1,7208	reiner Puffer	D. desulfuricans	14 Tage	1,7097	0,0111	0,65
13	1,7991	reiner Puffer	D. vulgaris	14 Tage	1,7890	0,0101	0,56
14	0,8693	reiner Puffer	D. vulgaris	14 Tage	0,7757	0,0936	10,77
15	1,5398	aqua dest.	./.	14 Tage	1,5428	-0,0030	-0,19
16	0,7271	reines Medium	./.	14 Tage	0,7114	0,0157	2,16
17	0,7532	4 ml P, 1 ml M	./.	14 Tage	0,7416	0,0116	1,54
18	1,0710	unbeimpfer P	./.	14 Tage	1,0706	0,0004	0,04

Vergleich der Bakterientätigkeiten bei Zugabe von Gipswürfeln zu verschiedenen Nährlösungen

	Nährlösung		Bakterienkultur	
Gips 1	reines Medium		D. vulgaris	
Datum	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.	
26.07.	-	-	-	
27.06.	-	-	-	
28.07.	sehr hoch	keine	<10	
08.08.	sehr hoch	keine	~50	
12.08.	extrem hoch	partiell	70-80	
16.08.	extrem hoch	mittel	80	
26.08.	extrem hoch	partiell	70-80	K
30.08.	extrem hoch	partiell	60-70	K

	Nährlösung		Bakterienkultur
Gips 6	reines Medium		D. desulfuricans
Datum	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
26.07.	-	-	-
27.06.	-	-	-
28.07.	sehr hoch	kaum	>90
08.08.	sehr hoch	keine	>80
12.08.	extrem hoch	partiell	90
16.08.	extrem hoch	mittel	80
26.08.	extrem hoch	partiell	100
30.08.	extrem hoch	partiell	80

	Nährlösung		Bakterienkultur
Gips 2	reiner Puffer		D. vulgaris
Datum	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
26.07.	↑	keine	<10
27.06.		keine	~50
28.07.	vorgegeben	keine	<10
08.08.	durch	keine	<10
12.08.	Zentrifugation	partiell	30
16.08.	↓	keine	<5
26.08.	super extrem	partiell	5-10
30.08.	extrem hoch	partiell	20-30

	Nährlösung		Bakterienkultur
Gips 4	reiner Puffer		D. desulfuricans
Datum	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
26.07.	↑	keine	~50
27.06.		keine	>80
28.07.	vorgegeben	keine	>90
08.08.	durch	keine	50-60
12.08.	Zentrifugation	partiell	80-90
16.08.	↓	keine	50
26.08.	super extrem	partiell	60-70
30.08.	mittel-hoch	keine	60

	Nährlösung		Bakterienkultur
Gips 3	5 ml P, 1 ml M		D. desulfuricans
Datum	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
26.07.	-	-	-
27.06.	mittel	partiell	>80
28.07.	hoch	partiell	>80
08.08.	hoch	partiell	70-80
12.08.	sehr hoch	partiell	70-80
16.08.	sehr hoch	partiell	80
26.08.	sehr hoch	partiell	70
30.08.	extrem hoch	partiell	70-80

	Nährlösung		Bakterienkultur
Gips 5	5 ml P, 1 ml M		D. vulgaris
Datum	Zelldichte	Bewegung	grüne Fl.
26.07.	-	-	-
27.06.	mittel	stark	60-70
28.07.	hoch	keine	~50
08.08.	hoch	partiell	70-80
12.08.	sehr hoch	mittel	70-80
16.08.	sehr hoch	mittel	80
26.08.	hoch-sehr hoch	partiell	80-90
30.08.	hoch	partiell	80

K= Kontamination

Lebensdauer der Bakterien in Puffer und/oder Medium + Puffer mit und ohne Gipswürfel

Beginn des Versuches am 01.09.

Kultur 21.08. 30 ml M, 5 ml P **ohne Gips**

Datum	Zelldichte V	Beweglichkeit V	grüne Fl.
02.09.	hoch	mittel	50
03.09.	hoch	stark	80-90
04.09.	extrem hoch	stark	>90
05.09.	hoch-sehr hoch	partiell	60-70
06.09.	hoch	partiell	70-80
07.09.	sehr hoch	partiell	100
08.09.	sehr hoch	partiell	100

30 ml M, 5 ml P **mit Gips**

Zelldichte V	Beweglichkeit V	grüne Fl.
extrem hoch	mittel	>80
mittel	stark	>90
mittel-hoch	stark	100
sehr-extrem hoch*	mittel-stark	100
hoch*	partiell	100
hoch-sehr hoch	partiell	100
hoch-sehr hoch	mittel	100

Kultur 21.08. 30 ml M, 5 ml P **ohne Gips**

Datum	Zelldichte D	Beweglichkeit D	grüne Fl.
02.09.	hoch-sehr hoch	stark	80
03.09.	hoch	keine	80-90
04.09.	extrem hoch	stark	>90
05.09.	extrem hoch	stark	100
06.09.	extrem hoch	stark	100
07.09.	extrem hoch	stark	100
08.09.	extrem hoch	stark	100

30 ml M, 5 ml P **mit Gips**

Zelldichte D	Beweglichkeit D	grüne Fl.
hoch-sehr hoch	mittel-stark	>80
hoch	stark	100
hoch	mittel	100
sehr-extrem hoch*	mittel	100
sehr hoch*	mittel	100
sehr-extrem hoch*	mittel	100
extrem hoch	stark	100

* größere Gipsklumpen mit stark besiedelter OF, Auszählung nicht möglich

Kultur 18.08.
zentrifugiert reiner Puffer **ohne Gips**

Datum	Zelldichte V	Beweglichkeit V	grüne Fl.
02.09.	mittel	partiell	50
03.09.	hoch	partiell	70
04.09.	mittel-hoch	partiell	60-70
05.09.	mittel-hoch	partiell	60-70
06.09.	hoch	partiell	70-80
07.09.	sehr-extrem hoch	mittel	80-90
08.09.	hoch	mittel	>80

Puffer + Gips **mit Gips**

Zelldichte V	Beweglichkeit V	grüne Fl.
mittel	keine	60
mittel	keine	70
mittel-hoch	partiell	60-70
hoch	mittel	70-80
mittel-hoch	partiell	60-70
mittel-hoch	keine	80-90
hoch*	mittel	100

Kultur 18.08.
zentrifugiert reiner Puffer **ohne Gips**

Datum	Zelldichte D	Beweglichkeit D	grüne Fl.
02.09.	hoch	partiell	80-90
03.09.	sehr hoch	partiell	90
04.09.	sehr-extrem	mittel	60-70
05.09.	mittel-hoch	partiell	>90
06.09.	hoch	stark	>90
07.09.	sehr-extrem hoch	partiell	100
08.09.	extrem hoch	stark	100

Puffer + Gips **mit Gips**

Zelldichte D	Beweglichkeit D	grüne Fl.
hoch-sehr hoch	partiell	80-90
sehr hoch	stark	>90
sehr-extrem	mittel	80-90
extrem hoch*	mittel-stark	>90
sehr hoch	partiell	80-90
extrem hoch*	stark	100
extrem hoch	stark	100

* größere Gipsklumpen mit stark besiedelter OF, Auszählung nicht möglich

Tropfenmessung Einzelwerte

Ø in cm, Zeit in min

	Messung 1					Messung 2				
Steinreihe I	**Ø**	**Zeit (28.07.)**	**Ø**	**Zeit (08.08.)**		**Steinreihe II**	**Ø**	**Zeit (15.08.)**	**Ø**	**Zeit (25.08.)**
A1	2,30	0,5687	2,00	0,2159		**A1**	2,00	0,1759	1,90	0,1203
2 Lagen	2,70	1,3812	2,00	0,3672		2 Lagen	2,00	0,1784	2,20	0,1319
	2,00	1,2266	2,00	0,3010			2,40	0,1844	2,00	0,1040
MW	**2,33**	**1,06**	**2,00**	**0,29**		**MW**	**2,13**	**0,18**	**2,03**	**0,12**
A2	1,90	0,4719	2,00	0,2984		**A2**	1,30	0,5740	2,00	0,2106
1 Lage	1,70	0,5013	2,00	0,2491		1 Lage	1,80	0,4035	1,80	0,1885
	2,10	0,5909	1,90	0,3528			1,80	0,5618	1,90	0,2125
MW	**1,90**	**0,52**	**1,97**	**0,30**		**MW**	**1,63**	**0,51**	**1,90**	**0,20**
B1	1,80	2,2747	1,70	1,0405		**B1**	1,60	1,4783	1,50	2,3660
2 Lagen	1,50	2,5821	1,80	2,1243		2 Lagen	2,20	1,1791	1,70	2,1369
	2,20	2,4693	1,90	1,4256			1,60	1,3007	1,50	2,0978
MW	**1,83**	**2,44**	**1,80**	**1,53**		**MW**	**1,80**	**1,32**	**1,57**	**2,20**
B2	2,30	1,0266	1,40	4,1733		**B2**	1,70	1,0997	1,80	0,2231
1 Lage	1,60	1,5953	2,40	1,2289		1 Lage	1,80	0,4712	1,60	0,3159
	1,80	1,3059	1,80	1,1278			2,00	0,4975	1,80	0,3506
MW	**1,90**	**1,31**	**1,87**	**2,18**		**MW**	**1,83**	**0,69**	**1,73**	**0,30**
C1	2,10	2,3500	2,00	0,5612		**C1**	2,20	0,1765	2,00	0,1023
2 Lagen	2,30	2,1615	1,80	0,5888		2 Lagen	2,30	0,1503	2,00	0,1487
	1,90	4,4571	1,90	0,5185			2,40	0,2200	1,80	0,1591
MW	**2,10**	**2,99**	**1,90**	**0,56**		**MW**	**2,30**	**0,18**	**1,93**	**0,14**
C2	1,80	1,3041	1,70	0,4387		**C2**	1,70	2,5032	2,00	0,4705
1 Lage	1,70	3,1438	1,60	0,3265		1 Lage	1,20	3,2325	2,00	0,2622
	1,70	2,5259	1,80	0,4678			1,30	3,0919	2,00	0,3322
MW	**1,73**	**2,32**	**1,70**	**0,41**		**MW**	**1,40**	**2,94**	**2,00**	**0,35**
L1	1,90	1,3547	1,40	2,4413		**L1**	1,00	2,0403	1,80	0,3538
2 Lagen	3,00	1,5819	1,80	2,5317		2 Lagen	2,00	1,0831	2,00	0,2572
	2,00	2,3553	1,80	2,0933			1,30	2,2975	1,50	0,4697
MW	**2,30**	**1,76**	**1,67**	**2,36**		**MW**	**1,43**	**1,81**	**1,77**	**0,36**
L2	0,70	2,5118	1,40	8,4412		**L2**	1,60	3,3217	2,00	0,2028
1 Lage	1,50	5,0359	1,50	2,3097		1 Lage	1,60	2,1225	1,80	0,3213
	1,00	9,0444	1,60	3,2200			1,70	1,5104	1,80	0,5662
MW	**1,07**	**5,53**	**1,50**	**4,66**		**MW**	**1,63**	**2,32**	**1,87**	**0,36**

A= Attapulgit
B= Bentonit
C= Carbopol
L= Laponit
M= Meerschaumpulver

2 Lagen= jeweils eine Lage Japanpapier unter und über der Kompressenpaste
1 Lage= eine Lage Zellstoff über der Kompressenpaste

Steinreihe I	Ø	Zeit (28.07.)	Ø	Zeit (08.08.)
M1	1,70	1,3913	1,70	1,1625
2 Lagen	2,00	2,3482	1,80	0,5769
	1,70	2,0863	1,70	1,1350
MW	**1,80**	**1,94**	**1,73**	**0,96**

Steinreihe II	Ø	Zeit (15.08.)	Ø	Zeit (25.08.)
M1	1,90	0,5146	1,90	0,0821
2 Lagen	1,80	0,2716	1,80	0,1281
	1,90	0,3894	1,80	0,2194
MW	**1,87**	**0,39**	**1,83**	**0,14**

M2	2,50	0,5387	2,40	0,3003
1 Lage	3,20	0,5157	2,30	0,4579
	2,50	1,0232	2,40	0,3281
MW	**2,73**	**0,69**	**2,37**	**0,36**

M2	2,10	0,3209	2,20	0,0856
1 Lage	2,20	0,2885	2,10	0,1810
	2,00	0,2329	1,90	0,1403
MW	**2,10**	**0,28**	**2,07**	**0,14**

ohne	2,00	0,2821	1,80	0,2362
Behandlung	1,90	0,1943	1,70	0,2834
	1,90	0,2178	1,90	0,3072
MW	**1,93**	**0,23**	**1,80**	**0,28**

ohne	1,80	0,3547	1,90	0,2319
Behandlung	1,80	0,2194	1,50	0,2677
	2,00	0,3146	1,50	0,3803
MW	**1,87**	**0,30**	**1,63**	**0,29**

A= Attapulgit
B= Bentonit
C= Carbopol
L= Laponit
M= Meerschaumpulver

2 Lagen= jeweils eine Lage Japanpapier unter und über der Kompressenpaste
1 Lage= eine Lage Zellstoff über der Kompressenpaste

Tropfenmessung Durchschnittswerte

Ø in cm, Zeit in min

Stein	Behandlung	Zellstofflagen	Messung	Ø- Werte	Messung I	Ø- Werte	Messung II
A1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 1	2,33	1,06	2,00	0,29
A1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 2	2,13	0,18	2,03	0,12
A2	mit Abdeckung	2 Lagen	Messung 1	1,90	0,52	1,97	0,30
A2	ohne Abdeckung	1 Lage	Messung 2	1,63	0,51	1,90	0,20
B1	ohne Abdeckung	1 Lage	Messung 1	1,83	2,44	1,80	1,53
B1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 2	1,80	1,32	1,57	2,20
B2	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 1	1,90	1,31	1,87	2,18
B2	mit Abdeckung	2 Lagen	Messung 2	1,83	0,69	1,73	0,30
C1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 1	2,10	2,99	1,90	0,56
C1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 2	2,30	0,18	1,93	0,14
C2	ohne Abdeckung	1 Lage	Messung 1	1,73	2,32	1,70	0,41
C2	mit Abdeckung	2 Lagen	Messung 2	1,40	2,94	2,00	0,35
L1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 1	2,30	1,76	1,67	2,36
L1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 2	1,43	1,81	1,77	0,36
L2	ohne Abdeckung	1 Lage	Messung 1	1,07	5,53	1,50	4,66
L2	mit Abdeckung	2 Lagen	Messung 2	1,63	2,32	1,87	0,36
M1	ohne Abdeckung	1 Lage	Messung 1	1,80	1,94	1,73	0,96
M1	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 2	1,87	0,39	1,83	0,14
M2	mit Abdeckung	1 Lage	Messung 1	2,73	0,69	2,37	0,36
M2	mit Abdeckung	2 Lagen	Messung 2	2,10	0,28	2,07	0,14
N1	ohne Behandlung	./.	Messung 1	1,93	0,23	1,80	0,28
N2	ohne Behandlung	./.	Messung 2	1,87	0,30	1,63	0,29
			MW	**1,89**	**1,44**	**1,85**	**0,84**

A= Attapulgit

B= Bentonit

C= Carbopol

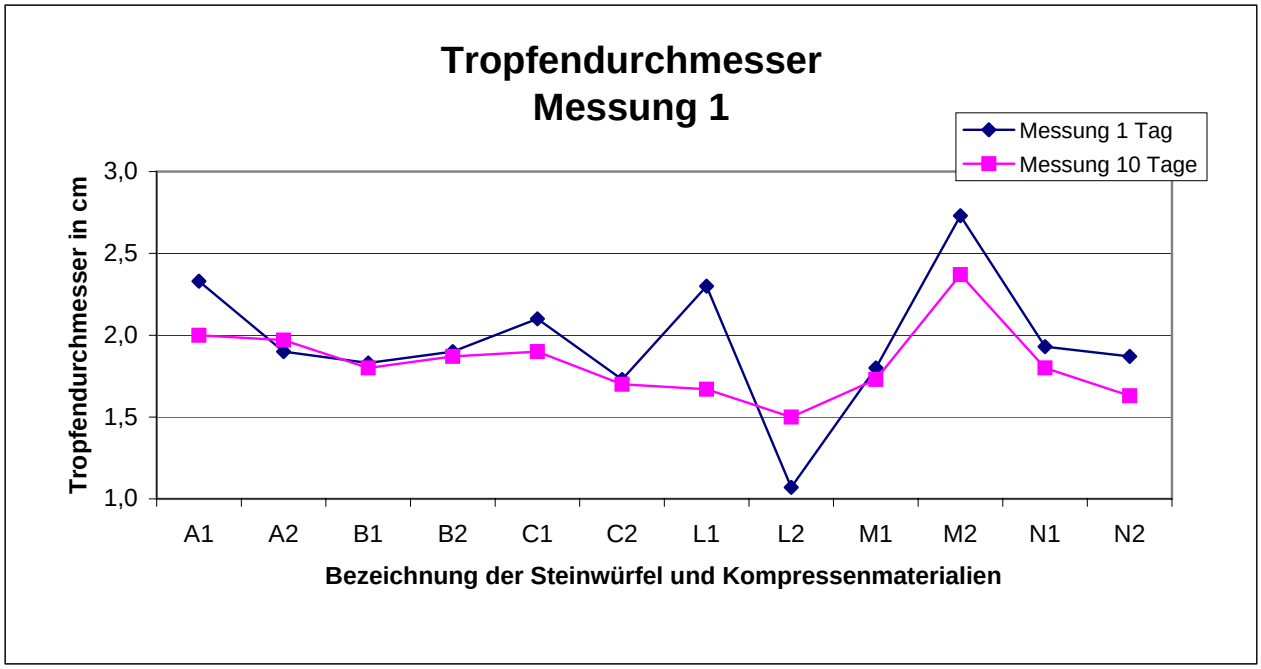
L= Laponit

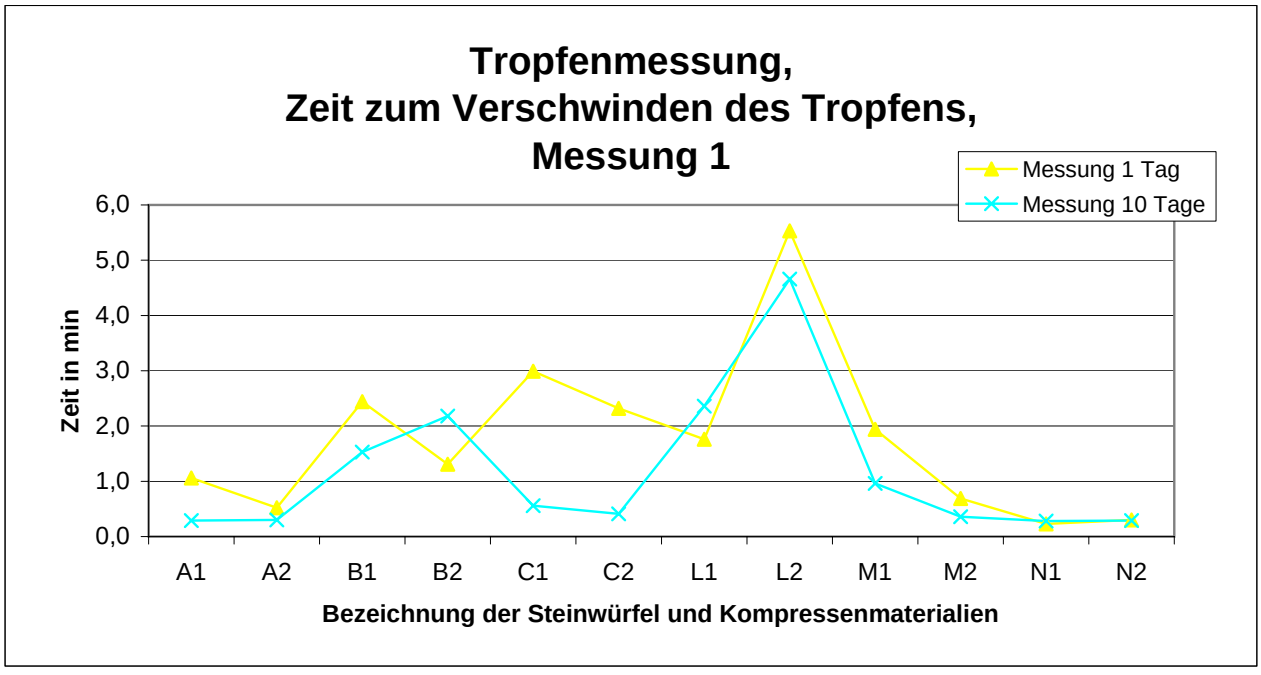
M= Meerschaumpulver

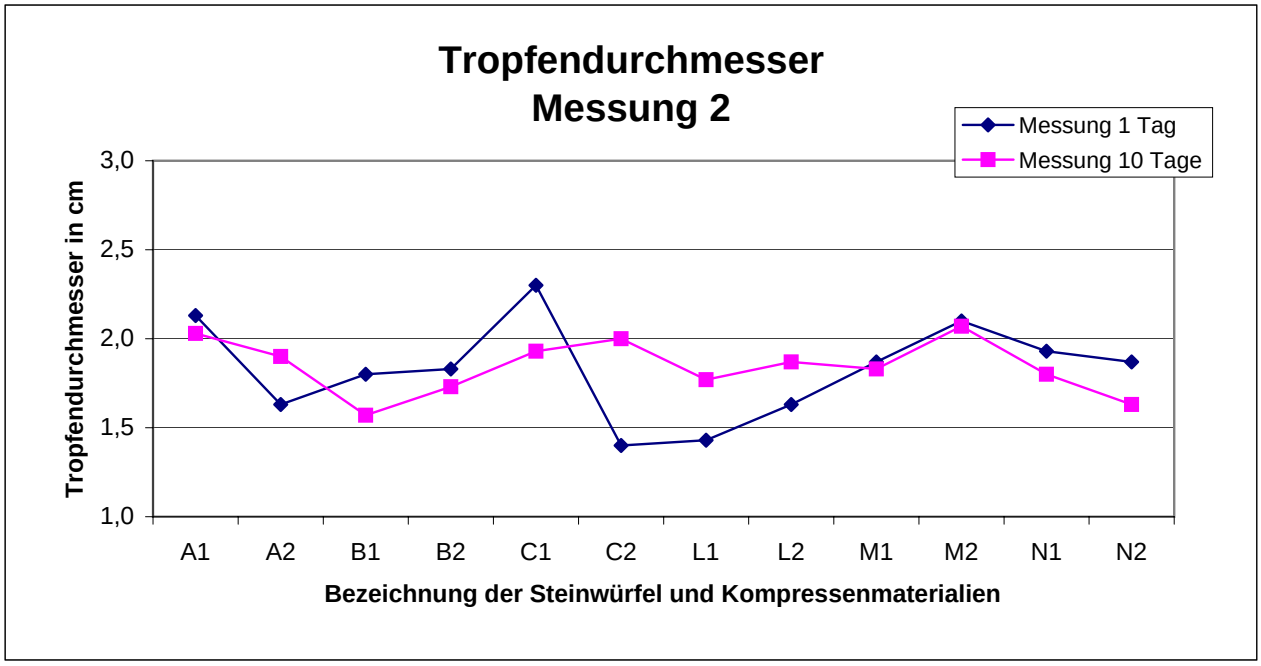
2 Lagen= jeweils eine Lage Japanpapier unter und über der Kompressenpaste

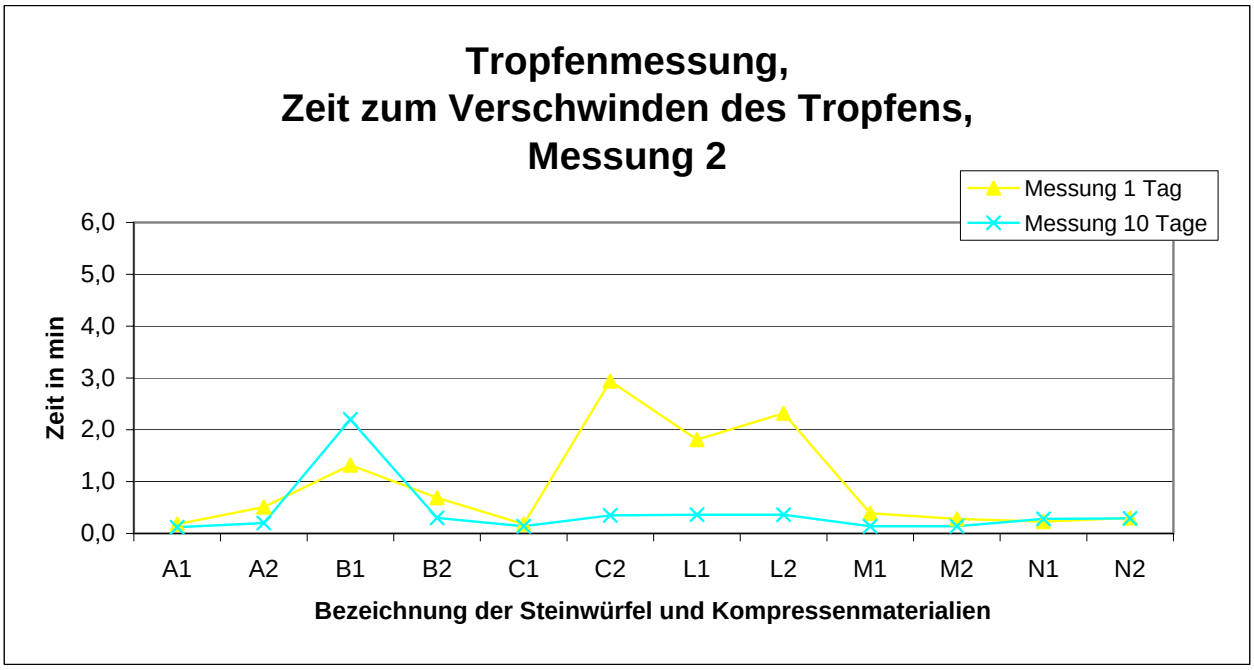
1 Lage= eine Lage Zellstoff über der Kompressenpaste

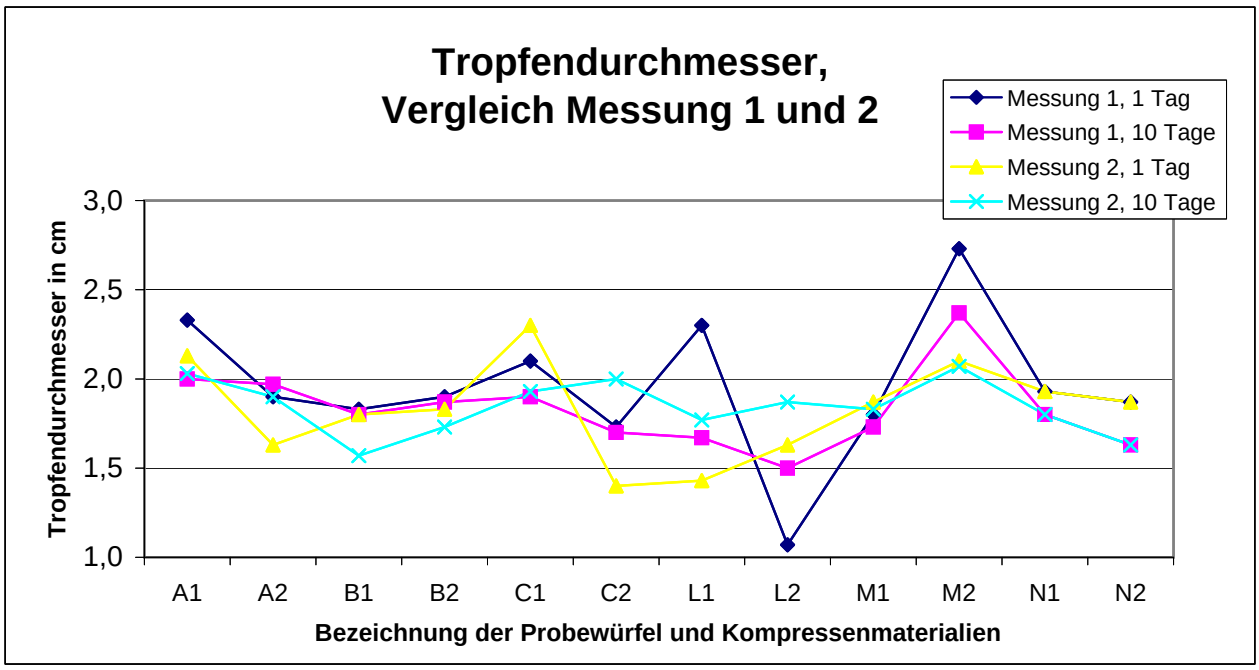
Abdeckung= mit PE- Folie

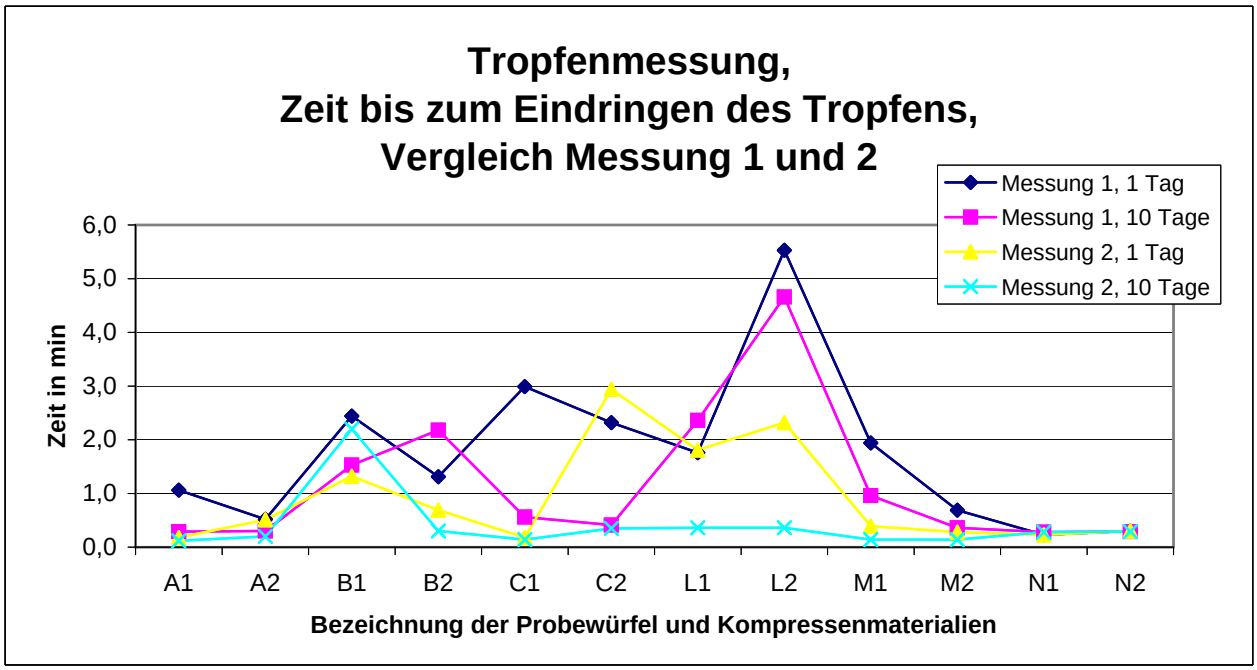

Tropfendurchmesser
Messung 1
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Tropfendurchmesser in cm
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfenmessung,
Zeit zum Verschwinden des Tropfens,
Messung 1
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Zeit in min
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfendurchmesser
Messung 2
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Tropfendurchmesser in cm
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfenmessung,
Zeit zum Verschwinden des Tropfens,
Messung 2
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Zeit in min
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfendurchmesser,
Vergleich Messung 1 und 2
Messung 1, 1 Tag
Messung 1, 10 Tage
Messung 2, 1 Tag
Messung 2, 10 Tage
Tropfendurchmesser in cm
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Probewürfel und Kompressenmaterialien

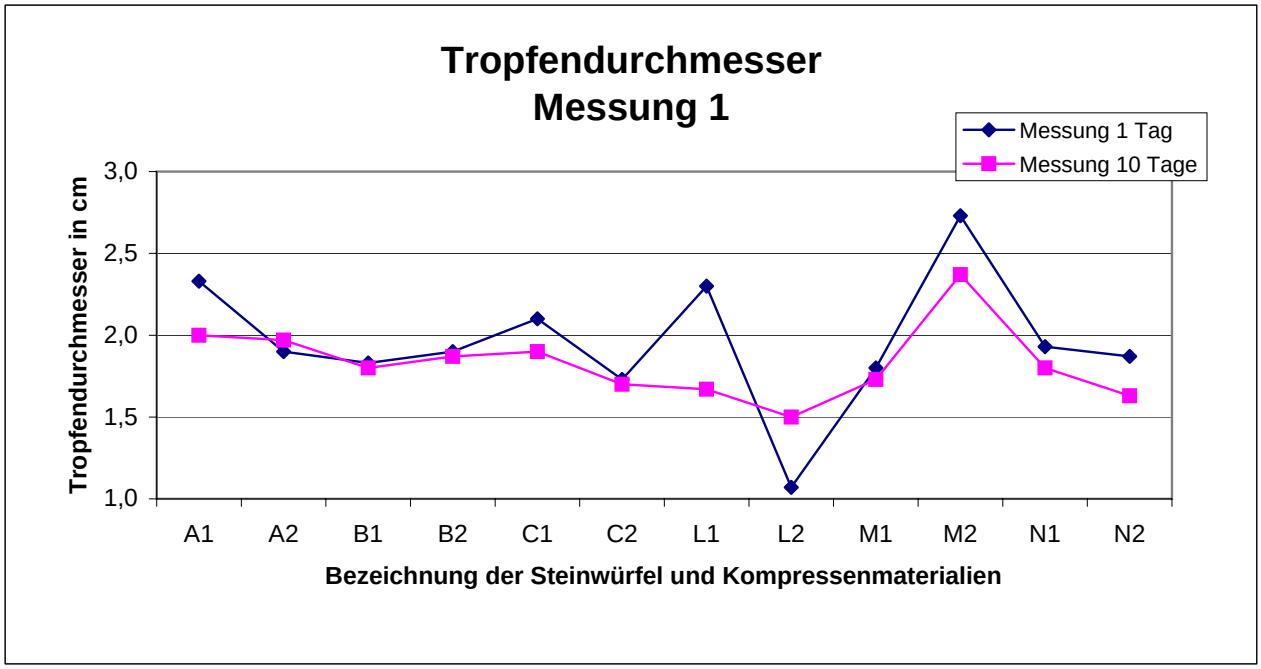

Tropfenmessung,
Zeit bis zum Eindringen des Tropfens,
Vergleich Messung 1 und 2
Messung 1, 1 Tag
Messung 1, 10 Tage
Messung 2, 1 Tag
Messung 2, 10 Tage
Zeit in min
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Probewürfel und Kompressenmaterialien

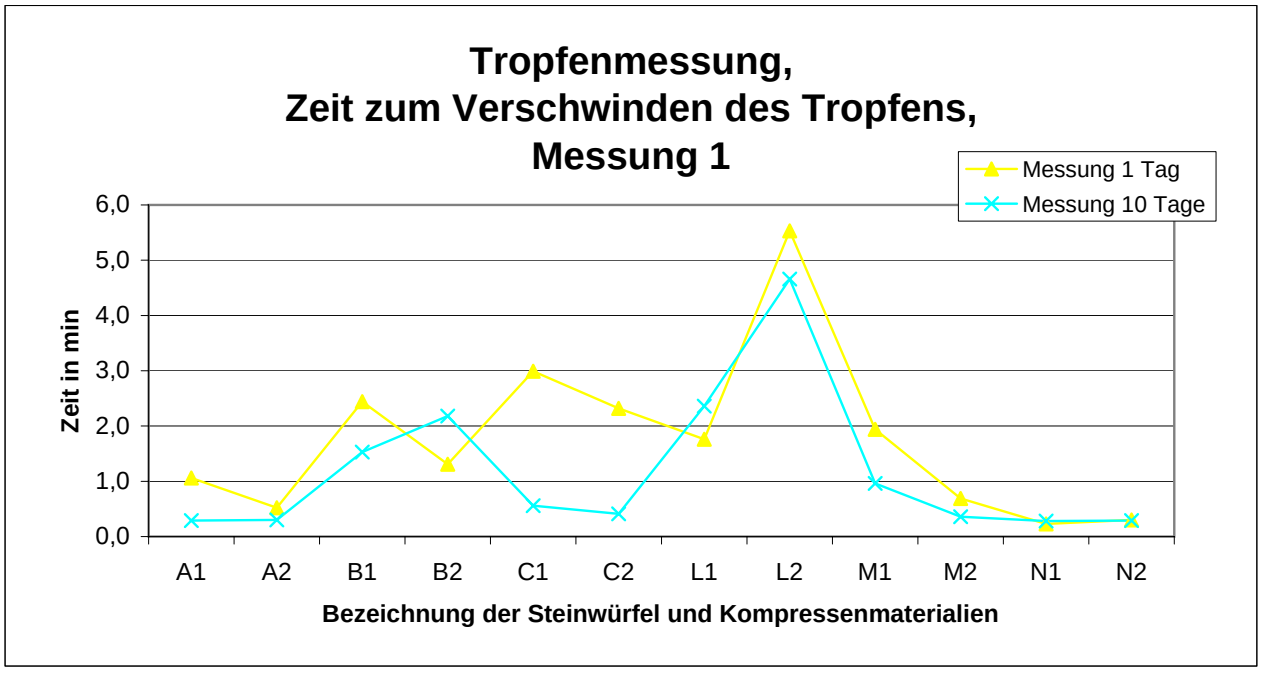
Kompressenbehandlung Gewichtsvergleich

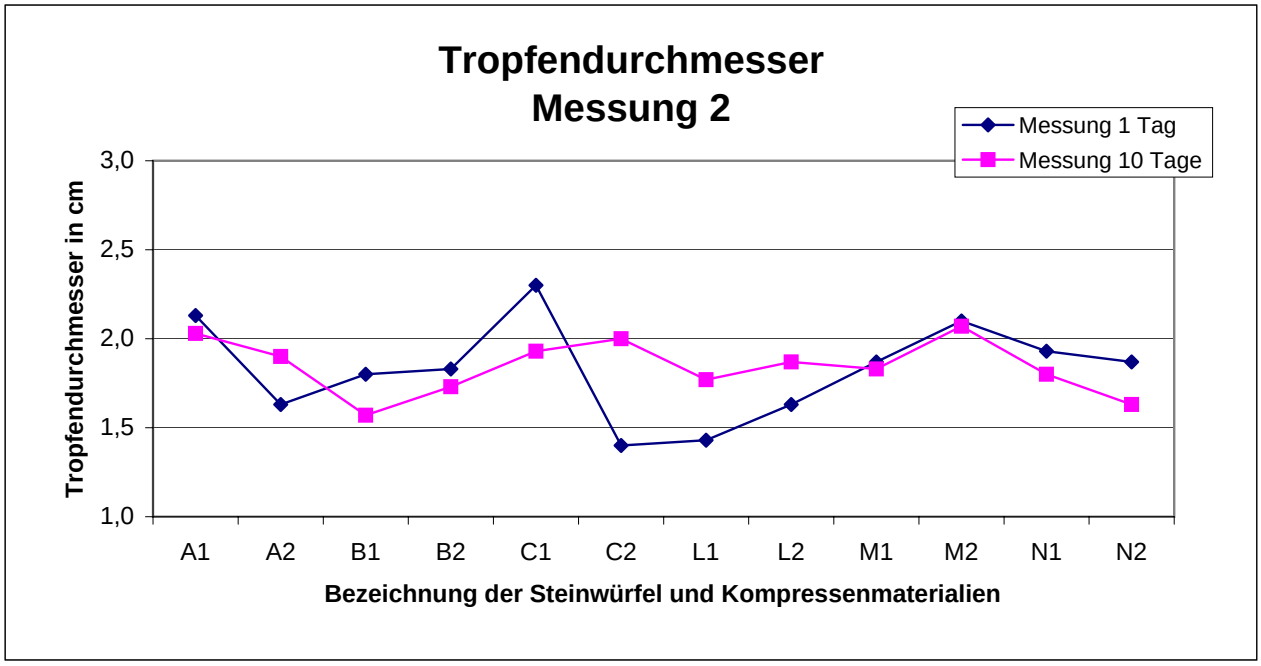
Gewicht der Steinwürfel in g

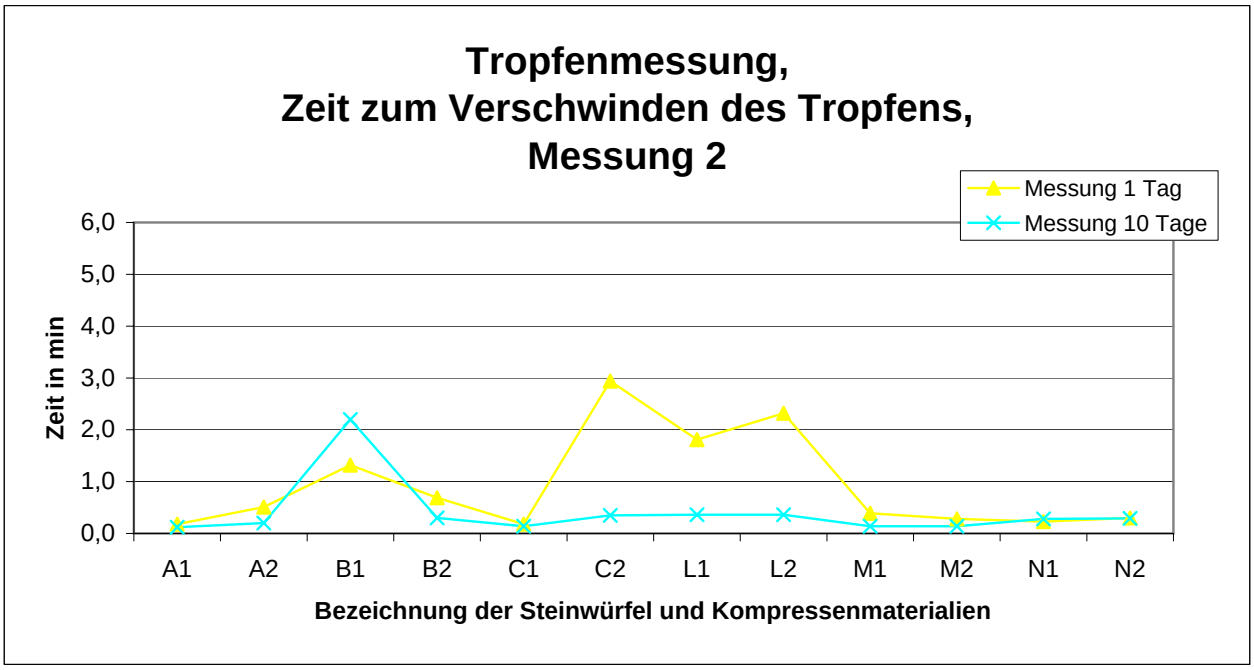
1. Messung	vor Behandlung	nach Trocknen	Gewichtsabnahme
Attapulgit 1	160,560	160,536	-0,024
Attapulgit 2	160,792	160,768	-0,024
Bentonit 1	160,186	160,174	-0,012
Bentonit 2	161,449	161,451	0,002
Carbopol 1	160,324	160,315	-0,009
Carbopol 2	161,434	161,429	-0,005
Laponit 1	161,165	161,165	0,000
Laponit 2	161,185	161,177	-0,008
Meerschaumpulver 1	161,035	161,019	-0,016
Meerschaumpulver 2	161,251	161,236	-0,015
		Ø	**-0,011**

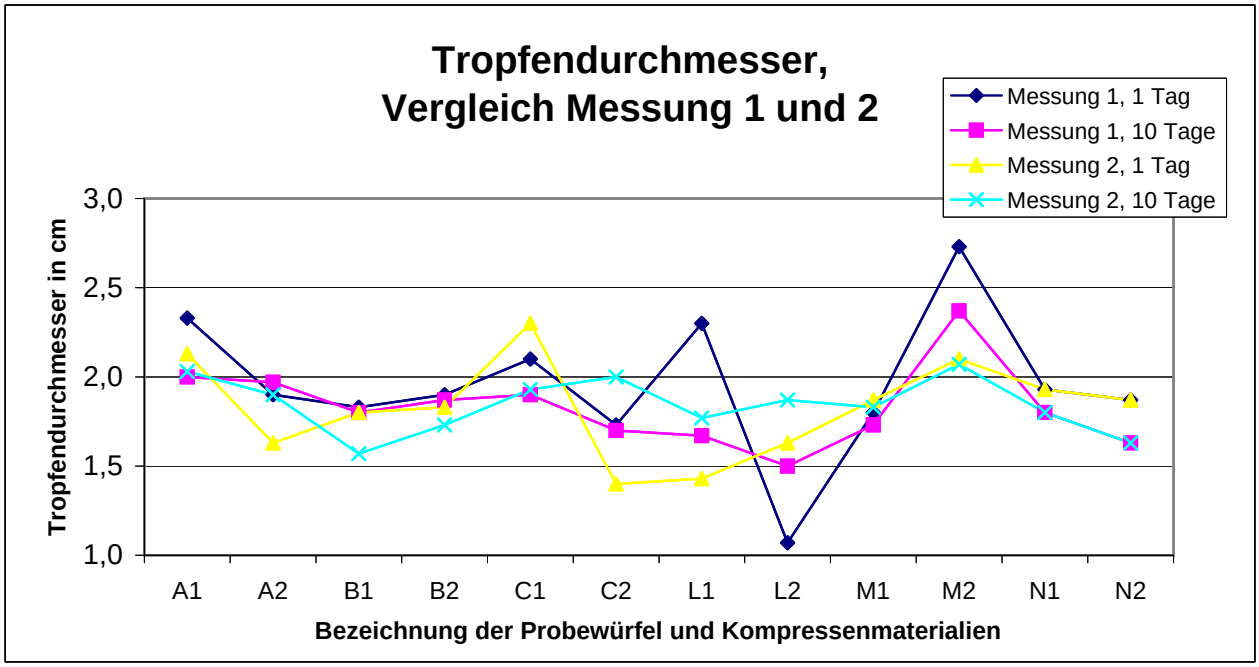
2. Messung	vor Behandlung	nach Trocknen	Gewichtsabnahme
Attapulgit 1	146,248	146,219	-0,029
Attapulgit 2	146,434	146,393	-0,041
Bentonit 1	147,106	147,093	-0,013
Bentonit 2	141,792	141,747	-0,045
Carbopol 1	147,502	147,494	-0,008
Carbopol 2	147,449	147,440	-0,009
Laponit 1	140,622	140,595	-0,027
Laponit 2	147,043	146,999	-0,044
Meerschaumpulver 1	145,856	145,830	-0,026
Meerschaumpulver 2	148,357	148,315	-0,042
		Ø	**-0,028**

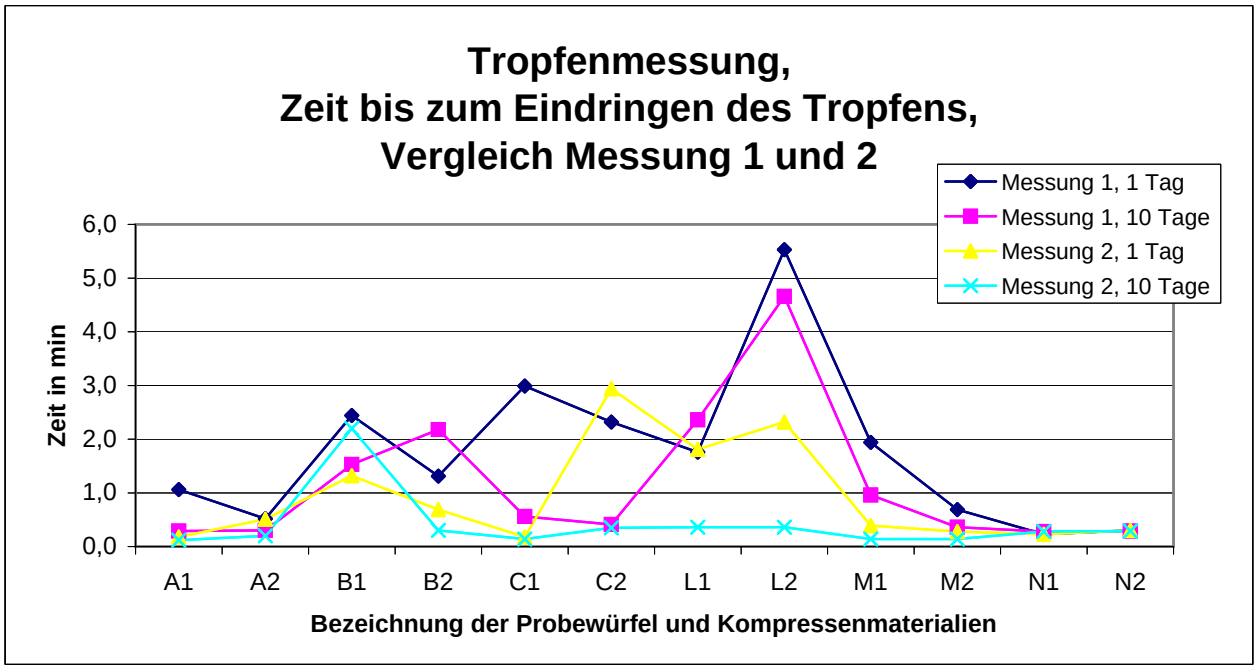

Tropfendurchmesser
Messung 1
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Tropfendurchmesser in cm
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfenmessung,
Zeit zum Verschwinden des Tropfens,
Messung 1
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Zeit in min
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfendurchmesser
Messung 2
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Tropfendurchmesser in cm
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfenmessung,
Zeit zum Verschwinden des Tropfens,
Messung 2
Messung 1 Tag
Messung 10 Tage
Zeit in min
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Steinwürfel und Kompressenmaterialien


Tropfendurchmesser,
Vergleich Messung 1 und 2
Messung 1, 1 Tag
Messung 1, 10 Tage
Messung 2, 1 Tag
Messung 2, 10 Tage
Tropfendurchmesser in cm
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Probewürfel und Kompressenmaterialien


Tropfenmessung,
Zeit bis zum Eindringen des Tropfens,
Vergleich Messung 1 und 2
Messung 1, 1 Tag
Messung 1, 10 Tage
Messung 2, 1 Tag
Messung 2, 10 Tage
Zeit in min
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
A1
A2
B1
B2
C1
C2
L1
L2
M1
M2
N1
N2
Bezeichnung der Probewürfel und Kompressenmaterialien

Applikation Polen

Probefläche Nr	Foliensystem	Bakterienlösung	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
3	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
4	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
5	PP- Folie 2- schichtig	Mix	Sandstein gelb	3 Tage
6	PP- Folie 2- schichtig	Mix	Sandstein gelb	6 Tage
7	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
8	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
9	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
10	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
11	PP- Folie 3- schichtig	Mix	Sandstein gelb	3 Tage
12	PP- Folie 3- schichtig	Mix	Sandstein gelb	6 Tage
13	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein gelb	3 Tage
14	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein gelb	6 Tage
15	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein gelb	3 Tage
16	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein gelb	6 Tage
17	Carbopol	Mix	Sandstein gelb	3 Tage
18	Carbopol	Mix	Sandstein gelb	6 Tage
19	PP- Folie 2- schichtig	reiner Puffer	Sandstein gelb	6 Tage
20	PP- Folie 3- schichtig	reiner Puffer	Sandstein gelb	6 Tage
21	Carbopol	reiner Puffer	Sandstein gelb	6 Tage
22	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein rot	3 Tage
23	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein rot	3 Tage
24	Carbopol	Mix	Sandstein rot	3 Tage

Applikation Dom

Probefläche Nr	Foliensystem	Bakterienlösung	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
3	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
4	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
5	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein	3 Tage
6	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein	3 Tage
7	Carbopol	unbeimpft	Sandstein	3 Tage
8	PP- Folie 3- schichtig	unbeimpft	Sandstein	3 Tage
9	Arbocel	Ammoniumcarbonat	Sandstein	3 Tage

Applikation Labor

Probefläche Nr	Foliensystem	Bakterienlösung	Gesteinsart	Dauer Applikation
1	PP- Folie 2- schichtig	D. vulgaris	Sandstein II	3 / 6 Tage
2	PP- Folie 2- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein I	3 / 6 Tage
3	PP- Folie 3- schichtig	D. vulgaris	Sandstein II	3 / 6 Tage
4	PP- Folie 3- schichtig	D. desulfuricans	Sandstein I	3 / 6 Tage
5	Carbopol	D. vulgaris	Sandstein II	3 / 6 Tage
6	Carbopol	D. desulfuricans	Sandstein I	3 / 6 Tage
7	PP- Folie 3- schichtig	aqua dest.	Sandstein II	3 Tage
8	Carbopol	Puffer- Medium	Sandstein II	3 Tage
9	PP- Folie 3- schichtig	Puffer- Medium	Sandstein II	3 Tage
10	Arbocel	Ammoniumcarbonat	Sandstein II	1 Tag

Pufferbeimpfung für Polen

Puffer Nr.	Datum Herstellung Puffer	Datum Kulturanzucht	Kultur Art	Datum der Mischung	Verhältnis
1	09.09.	03.09.	D. vulgaris	15.09.	4:1
2	09.09.	03.09.	D. desulfuricans	15.09.	4:1
3	09.09.	05.09.	D. desulfuricans	16.09.	4:1
4	09.09.	05.09.	D. vulgaris	16.09.	4:1
5	14.09.	08.09.	D. vulgaris	16.09.	4:1
6	14.09.	08.09.	D. desulfuricans	16.09.	4:1
7	14.09.	05.09.	D. vulgaris	16.09.	4:1
8	14.09.	05.09.	D. desulfuricans	16.09.	4:1
9	01.09.	07.09.	V+D	16.09.	4:1

Pufferbeimpfung für den Dom

Puffer Nr.	Datum Herstellung Puffer	Datum Kulturanzucht	Kultur Art	Datum der Mischung	Verhältnis
1	14.10.	13.10.	D. vulgaris	18.10.	4:1
2	14.10.	13.10.	D. vulgaris	18.10.	4:1
3	14.10.	13.10.	D. desulfuricans	18.10.	4:1
4	14.10.	13.10.	D. desulfuricans	18.10.	4:1

Pufferbeimpfung für die Laborversuche

Puffer Nr.	Datum Herstellung Puffer	Datum Kulturanzucht	Kultur Art	Datum der Mischung	Verhältnis
1	14.10.	13.10.	D. vulgaris	18.10.	4:1
2	14.10.	13.10.	D. desulfuricans	18.10.	4:1

Mirowskimessung Labor Wasseraufnahme in ml

	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2
aqua dest.	unbehandelt	unbehandelt	Carbopol	Carbopol	PP- Folie	PP- Folie
Zeit in min	ml	ml	ml	ml	ml	ml
1	0,00	0,10	0,10	0,30	0,35	0,80
2	0,00	0,20	0,10	0,30	0,35	0,80
3	0,30	0,20	0,10	0,30	0,35	0,80
4	0,30	0,25	0,10	0,30	0,35	0,80
5	0,30	0,25	0,10	0,30	0,35	0,80
10	0,40	0,40	0,20	0,30	0,35	0,80
15	0,40	0,40	0,30	0,40	0,35	0,85
20	0,50	0,40	0,30	0,45	0,40	0,90
25	0,50	0,45	0,35	0,45	0,40	0,90
30	0,65	0,50	0,45	0,55	0,45	0,95
35	0,70	0,50	0,50	0,60	0,50	1,00
40	0,70	0,50	0,55	0,60	0,55	1,00
45	0,75	0,55	0,65	0,65	0,60	1,00
50	0,80	0,55	0,70	0,70	0,65	1,10
55	0,95	0,60	0,70	0,70	0,65	1,10
60	1,00	0,60	0,80	0,70	0,70	1,10
65	1,00	0,65	0,85	0,70	0,70	1,15
70	1,15	0,65	0,90	0,75	0,70	1,15
75	1,15	0,65	0,95	0,80	0,80	1,15
80	1,15	0,65	1,00	0,80	0,80	1,20
85	1,15	0,70	1,05	0,80	0,90	1,25
90	1,15	0,70	1,00	0,85	0,95	1,25

Mirowskimessung Labor Wasseraufnahme Durchmesser des Eindringtropfens

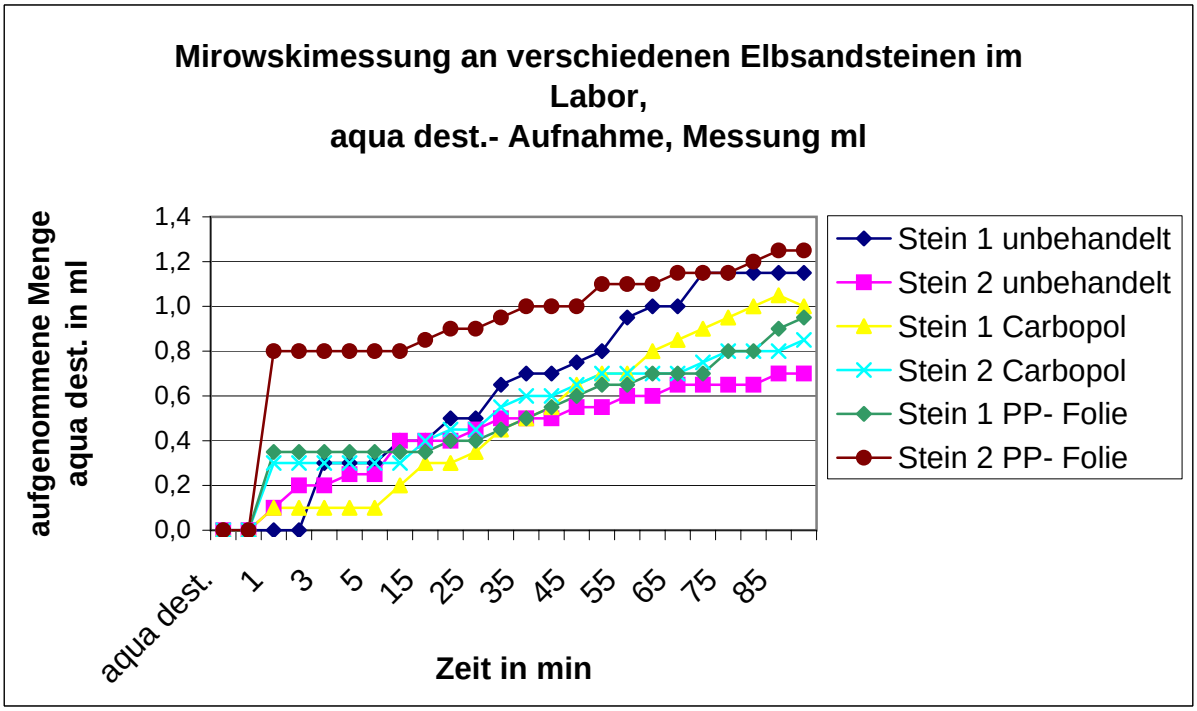
	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2
aqua dest.	unbehandelt	unbehandelt	Carbopol	Carbopol	PP-Folie	PP-Folie
Zeit in min	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser
1	1,3	1,5	1,8	1,5	2,1	1,7
2	1,9	1,5	1,8	1,5	2,2	1,7
3	2,3	1,5	2,0	1,7	2,3	2,0
4	2,4	2,0	2,0	1,7	2,4	2,0
5	2,5	2,0	2,2	1,8	2,4	2,1
10	2,6	2,0	2,4	2,3	2,5	2,1
15	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5	2,1
20	2,6	2,3	2,5	2,5	2,7	2,1
25	2,6	2,3	2,8	2,6	2,6	2,2
30	2,7	2,4	3,0	3,0	2,7	2,2
35	2,6	2,3	3,2	3,0	3,0	2,4
40	2,7	2,4	3,3	3,0	3,1	2,4
45	2,7	2,3	3,5	3,0	3,3	2,4
50	2,7	2,5	3,5	3,1	3,4	2,3
55	2,7	2,4	3,6	2,9	3,5	2,3
60	2,7	2,4	3,5	3,0	3,7	2,3
65	2,7	2,3	3,6	2,8	3,8	2,3
70	2,6	2,3	3,6	2,7	4,0	2,5
75	2,7	2,3	3,5	2,6	4,5	2,6
80	2,6	2,3	3,5	2,5	4,4	2,6
85	3,0	2,3	3,5	2,5	4,5	2,6
90	2,8	2,3	3,5	2,5	4,5	2,6

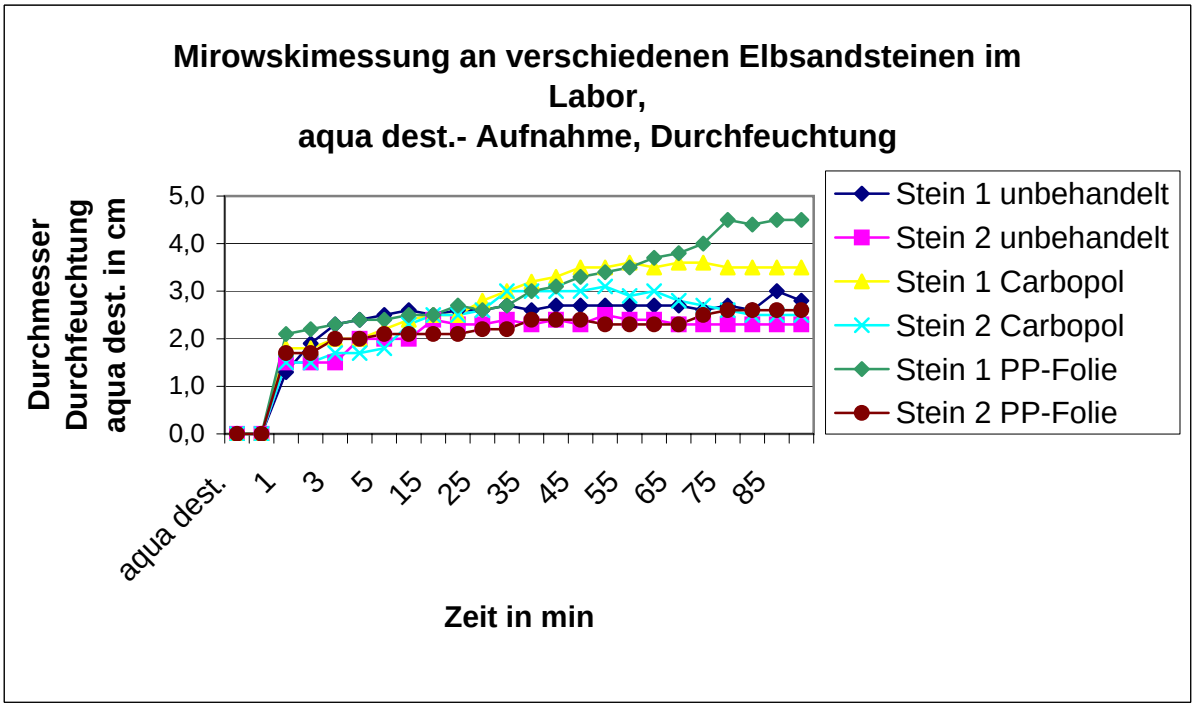
Mirowskimessung Labor Schellsol D 40- Aufnahme in ml

Schellsol D 40	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2
	unbehandelt	unbehandelt	Carbopol	Carbopol	PP- Folie	PP- Folie
Zeit in min	ml	ml	ml	ml	ml	ml
1	0,20	,,5	0,25	0,10	0,10	0,40
2	0,20	0,70	0,25	0,15	0,10	0,45
3	0,20	0,90	0,25	0,15	0,10	0,50
4	0,25	1,20	0,25	0,15	0,10	0,60
5	0,25	1,25	0,25	0,15	0,10	0,65
10	0,45	2,00	0,30	0,40	0,30	0,95
15	0,70	2,75	0,50	0,75	0,50	1,35
20	0,90	3,50	0,65	1,10	0,75	1,65
25	1,15	4,25	0,80	1,45	1,00	1,95
30	1,30	5,10	0,95	1,85	1,20	2,30
35	1,60	6,10	1,15	2,35	1,40	2,60
40	1,75	6,80	1,30	3,80	1,70	2,90
45	1,95	7,80	1,50	3,20	1,85	3,25
50	2,20	8,60	1,65	3,45	2,10	3,50
55	2,50	9,40	1,85	3,70	2,30	3,80
60	2,60	10,00	2,00	3,90	2,50	4,20
65	2,80		2,20	4,25	2,70	4,50
70	3,00		2,45	4,50	3,00	4,80
75	3,20		2,55	4,75	3,20	5,15
80	3,40		2,75	5,10	3,35	5,40
85	3,65		2,95	5,30	3,60	5,70
90	3,85		3,20	5,50	3,80	5,90

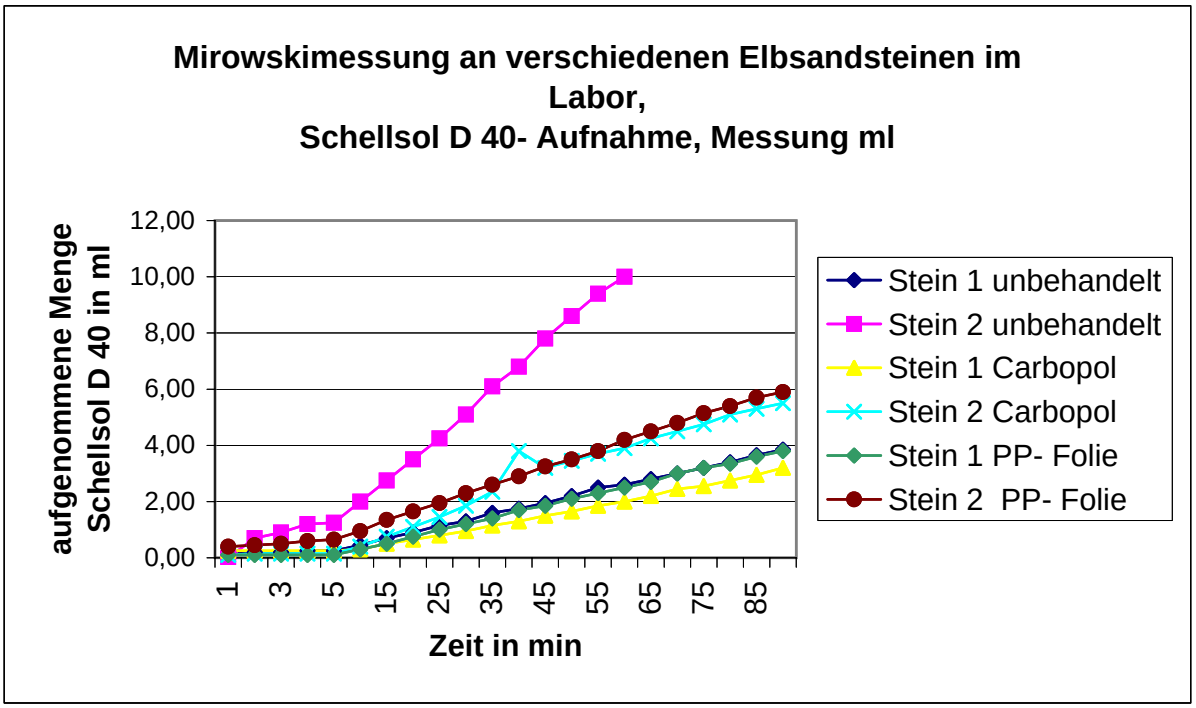
Mirowskimessung Labor Schellsol D 40- Aufnahme Durchmesser des Eindringtropfens

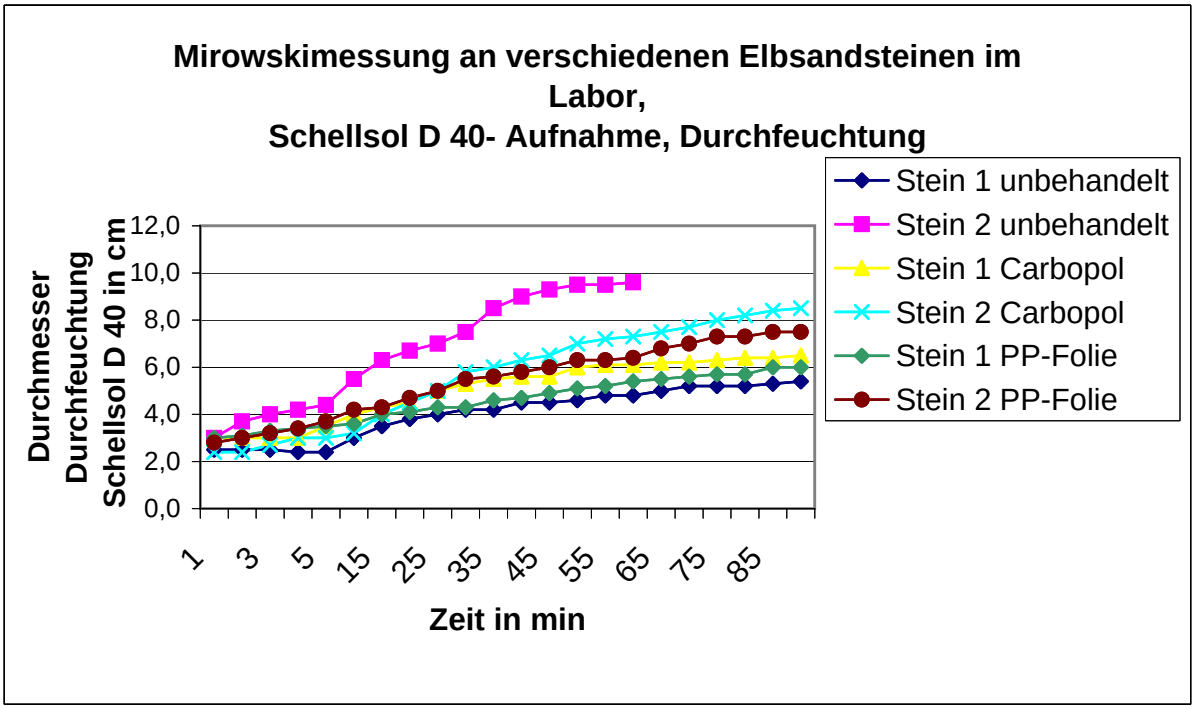
Schellsol D 40	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2
	unbehandelt	unbehandelt	Carbopol	Carbopol	PP-Folie	PP-Folie
Zeit in min	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser
1	2,5	3,0	3,0	2,4	3,0	2,8
2	2,5	3,7	3,0	2,4	3,1	3,0
3	2,5	4,0	3,0	2,7	3,3	3,2
4	2,4	4,2	3,0	3,0	3,4	3,4
5	2,4	4,4	3,5	3,0	3,5	3,7
10	3,0	5,5	4,0	3,2	3,6	4,2
15	3,5	6,3	4,3	4,0	4,0	4,3
20	3,8	6,7	4,5	4,5	4,1	4,7
25	4,0	7,0	5,0	5,0	4,3	5,0
30	4,2	7,5	5,3	5,8	4,3	5,5
35	4,2	8,5	5,5	6,0	4,6	5,6
40	4,5	9,0	5,6	6,3	4,7	5,8
45	4,5	9,3	5,6	6,5	4,9	6,0
50	4,6	9,5	6,0	7,0	5,1	6,3
55	4,8	9,5	6,1	7,2	5,2	6,3
60	4,8	9,6	6,1	7,3	5,4	6,4
65	5,0		6,2	7,5	5,5	6,8
70	5,2		6,2	7,7	5,6	7,0
75	5,2		6,3	8,0	5,7	7,3
80	5,2		6,4	8,2	5,7	7,3
85	5,3		6,4	8,4	6,0	7,5
90	5,4		6,5	8,5	6,0	7,5


Mirowskimessung an verschiedenen Elbsandsteinen im Labor,
aqua dest.- Aufnahme, Messung ml
aufgenommene Menge aqua dest. in ml
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
aqua dest.
1
3
5
15
25
35
45
55
65
75
85
Zeit in min
Stein 1 unbehandelt
Stein 2 unbehandelt
Stein 1 Carbopol
Stein 2 Carbopol
Stein 1 PP- Folie
Stein 2 PP- Folie


Mirowskimessung an verschiedenen Elbsandsteinen im Labor,
aqua dest.- Aufnahme, Durchfeuchtung
Durchmesser Durchfeuchtung aqua dest. in cm
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
aqua dest.
1
3
5
15
25
35
45
55
65
75
85
Zeit in min
Stein 1 unbehandelt
Stein 2 unbehandelt
Stein 1 Carbopol
Stein 2 Carbopol
Stein 1 PP-Folie
Stein 2 PP-Folie

Mirowskimessung an Laborsteinen Messung mit Schellsol D 40





Mirowskimessung Dom Wasseraufnahme in ml

Testfläche	unbehandelt	Carbopol	PP- Folie
Zeit in min	ml	ml	ml
1	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0
5	0,1	0,0	0,1
10	0,2	0,0	0,2
15	0,3	0,0	0,4
20	0,4	0,0	0,6
25	0,7	0,0	0,7
30	0,9	0,0	1,0
35	1,1	0,0	1,2
40	1,3	0,0	1,5
45	1,5	0,1	1,8
50	1,7	0,1	2,0
55	2,0	0,2	2,3
60	2,2	0,3	2,5
65	2,5	0,3	2,8
70	2,7	0,3	3,0
75	3,0	0,4	3,3
80	3,3	0,5	3,5
85	3,6	0,6	3,8
90	3,9	0,7	4,0

Mirowskimessung Dom Wasseraufnahme
Durchmesser des Eindringtropfens in cm

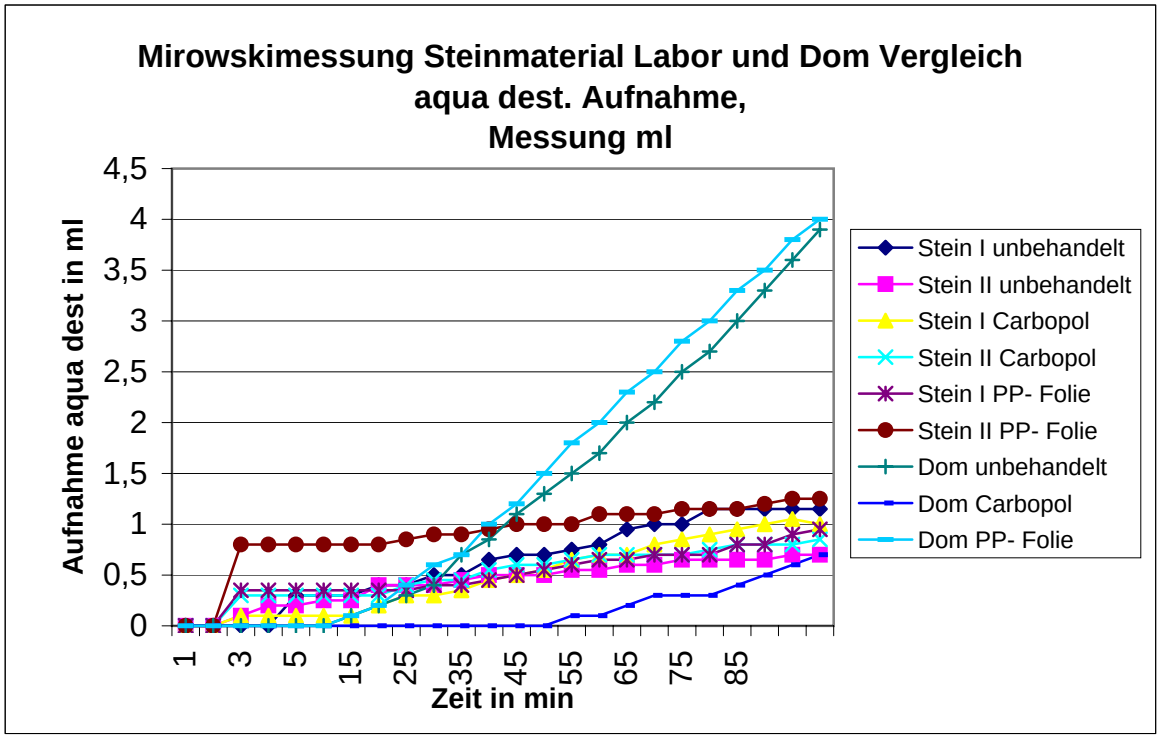
Testfläche	unbehandelt	Carbopol	PP-Folie
Zeit in min	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser
1	3,0	1,9	2,9
2	3,0	2,1	4,1
3	3,1	2,5	4,4
4	4,0	2,9	4,6
5	4,2	3,2	5,0
10	4,5	4,0	5,5
15	5,0	5,4	6,3
20	5,0	5,3	6,7
25	5,2	5,6	6,7
30	6,0	5,8	6,9
35	6,0	5,8	6,9
40	6,5	5,9	6,8
45	6,7	5,9	7,1
50	7,0	6,0	6,7
55	7,2	6,2	7,0
60	7,5	6,4	6,6
65	7,5	6,1	6,7
70	8,0	6,1	7,1
75	8,2	6,1	6,9
80	8,5	6,1	6,9
85	8,5	6,1	6,8
90	9,0	6,1	6,7

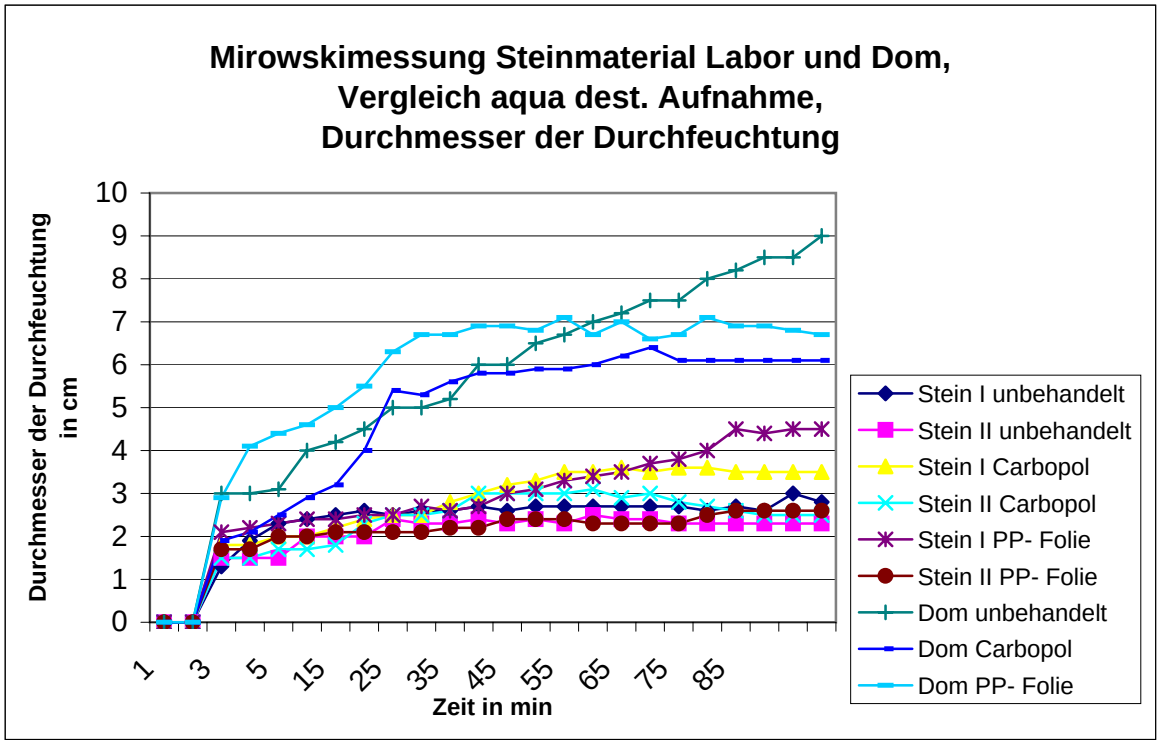
Mirowskimessung Dom Schellsol D 40- Aufnahme in ml

Testfläche 6	unbehandelt	Carbopol	PP- Folie
Zeit in min	ml	ml	ml
1	0,1	0,4	0,0
2	0,1	0,5	0,1
3	0,1	0,5	0,1
4	0,1	0,5	0,1
5	0,1	0,5	0,1
10	0,1	0,5	0,1
15	0,2	0,6	0,1
20	0,2	0,7	0,1
25	0,3	0,8	0,2
30	0,3	0,8	0,3
35	0,3	0,8	0,3
40	0,4	0,9	0,4
45	0,4	1,0	0,5
50	0,5	1,0	0,5
55	0,5	1,0	0,6
60	0,6	1,1	0,6
65	0,6	1,1	0,7
70	0,7	1,2	0,8
75	0,7	1,3	0,9
80	0,7	1,3	0,9
85	0,8	1,4	1,0
90	0,8	1,5	1,1

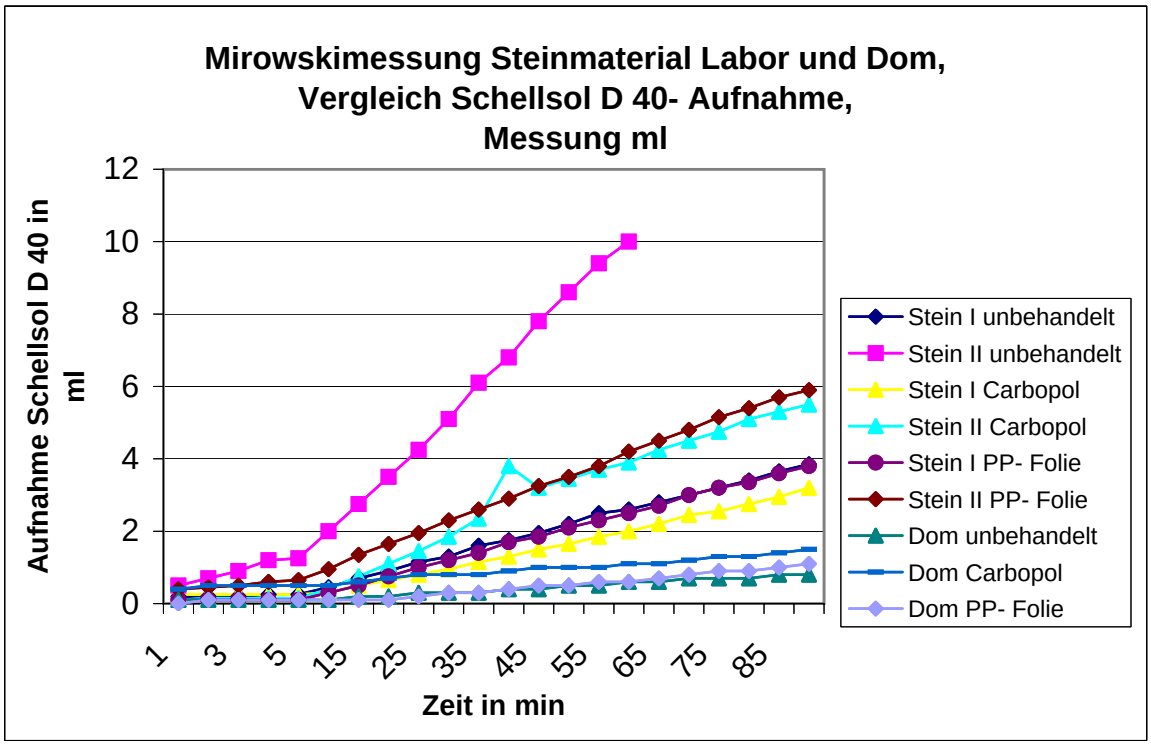
Mirowskimessung Dom Schellsol D 40- Aufnahme
Durchmesser des Eindringtropfens in cm

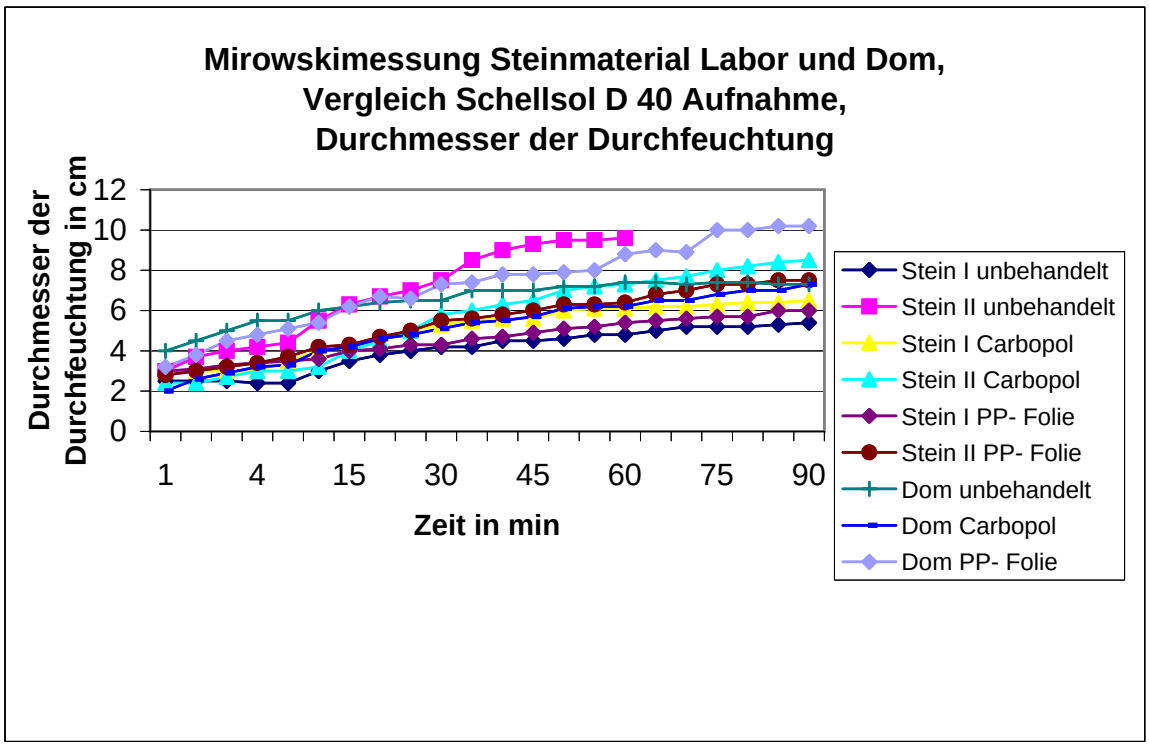
Testfläche 6	unbehandelt	Carbopol	PP- Folie
Zeit in min	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser
1	4,0	2,0	3,2
2	4,5	2,6	3,8
3	5,0	2,9	4,5
4	5,5	3,2	4,8
5	5,5	3,3	5,1
10	6,0	4,0	5,4
15	6,2	4,2	6,2
20	6,4	4,6	6,7
25	6,5	4,8	6,6
30	6,5	5,1	7,3
35	7,0	5,4	7,4
40	7,0	5,5	7,8
45	7,0	5,7	7,8
50	7,2	6,1	7,9
55	7,2	6,2	8,0
60	7,4	6,2	8,8
65	7,4	6,5	9,0
70	7,3	6,5	8,9
75	7,4	6,8	10,0
80	7,4	7,0	10,0
85	7,3	7,0	10,2
90	7,3	7,3	10,2


Mirowskimessung Steinmaterial Labor und Dom Vergleich
aqua dest. Aufnahme,
Messung ml
Aufnahme aqua dest in ml
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
1
3
5
15
25
35
45
55
65
75
85
Zeit in min
Stein I unbehandelt
Stein II unbehandelt
Stein I Carbopol
Stein II Carbopol
Stein I PP- Folie
Stein II PP- Folie
Dom unbehandelt
Dom Carbopol
Dom PP- Folie


Mirowskimessung Steinmaterial Labor und Dom,
Vergleich aqua dest. Aufnahme,
Durchmesser der Durchfeuchtung
Durchmesser der Durchfeuchtung
in cm
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
1
3
5
15
25
35
45
55
65
75
85
Zeit in min
Stein I unbehandelt
Stein II unbehandelt
Stein I Carbopol
Stein II Carbopol
Stein I PP- Folie
Stein II PP- Folie
Dom unbehandelt
Dom Carbopol
Dom PP- Folie

Vergleich der Messungen in Labor und Dom, Schellsol D 40- Aufnahme





Gewicht der Proben in g

Wasserdampfdiffusion unbehandelte Oberflächen

	Probenbezeichnung	30.11.	01.12.	02.12.	03.12.	04.12.	05.12.
1	V1 OB	23,1183	22,9270	22,7507	22,5621	22,1794	22,0078
2	V2 OB	22,2961	22,0907	21,9271	21,7528	21,5921	21,4372
3	V3 OB	24,3280	24,1816	24,0178	23,8405	23,6754	23,5155
4	D1 OB	25,8091	25,6734	25,5192	25,3571	25,2058	25,0585
5	D2 OB	26,8261	26,7106	26,5789	26,4385	26,3049	26,1744
6	D3 OB	22,7675	22,5971	22,3503	22,1441	21,9528	21,7660
7	Nullprobe	21,9480	21,8360	21,6618	21,4949	21,3398	21,1705

Wasserdampfdiffusion behandelte Oberflächen

	Probenbezeichnung	08.12.	09.12.	10.12.	11.12.	13.12.	14.12.
1	V1 MB	25,4582	25,0018	24,6376	24,4173	24,0929	23,9399
2	V2 MB	22,7576	22,3929	21,9424	21,6750	21,3171	21,1206
3	V3 MB	27,9039	27,4655	27,0229	26,7605	26,4791	26,3409
4	D1 MB	25,4273	24,7850	24,1191	23,7290	23,4161	23,2540
5	D2 MB	27,0869	26,6761	26,1991	25,6333	25,3139	25,1104
6	D3 MB	25,5113	25,0344	24,5139	23,9767	23,6405	23,4760
7	Wasserkompresse	23,5024	22,8804	22,6226	22,3584	22,1355	21,8844

Gewichtsabnahme in g

Wasserdampfdiffusion unbehandelte Oberflächen

	Probenbezeichnung	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage
1	V1 OB	0,1913	0,1763	0,1886	0,3827	0,1716
2	V2 OB	0,2054	0,1636	0,1743	0,1607	0,1549
3	V3 OB	0,1464	0,1638	0,1773	0,1651	0,1599
4	D1 OB	0,1357	0,1542	0,1621	0,1513	0,1473
5	D2 OB	0,1155	0,1317	0,1404	0,1336	0,1305
6	D3 OB	0,1704	0,2468	0,2062	0,1913	0,1868
7	Nullprobe	0,1120	0,1742	0,1669	0,1551	0,1693

Wasserdampfdiffusion behandelte Oberflächen

	Probenbezeichnung	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage
1	V1 MB	0,4564	0,3642	0,2203	0,3244	0,1530
2	V2 MB	0,3647	0,4505	0,2674	0,3579	0,1965
3	V3 MB	0,4384	0,4426	0,2624	0,2814	0,1382
4	D1 MB	0,6423	0,6659	0,3901	0,3129	0,1621
5	D2 MB	0,4108	0,4770	0,5658	0,3194	0,2035
6	D3 MB	0,4769	0,5205	0,5372	0,3362	0,1645
7	Wasserkompresse	0,6220	0,2578	0,2642	0,2229	0,2511

Berechnung der Diffusionswiderstandszahl μ
gemäß der Formel:

$$\mu = \frac{\delta_l \cdot p_s \cdot \Delta a \cdot A \cdot t}{s \cdot \Delta m} _ \frac{s_l}{s}$$

δL=	$1{,}93 * 10^{-10}$	
ps=	$2{,}065 * 10^{3}$	
Δa=	1	(100% innen, 0% aussen)
A=	$0{,}625 * 10^{-3}$	
t=	24 h =	86400 sec = $86{,}4 * 10^{3}$
Δm=	variabel, der Tabelle zu entnehmen	
sL=	1	
s=	$5 * 10^{-3}$	

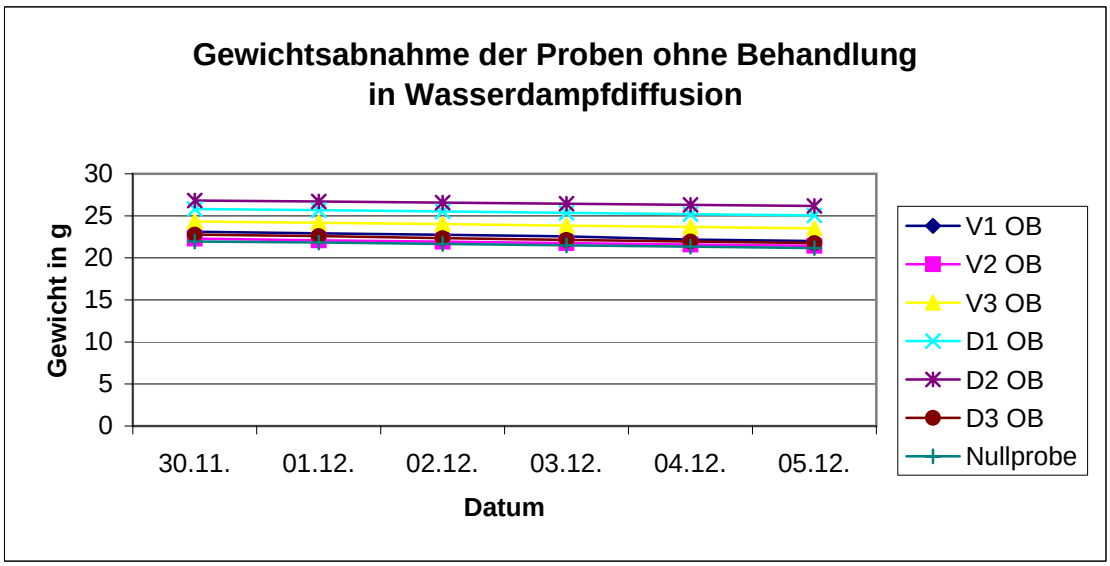
Berechnung der μ- Werte
unbehandelte Oberflächen

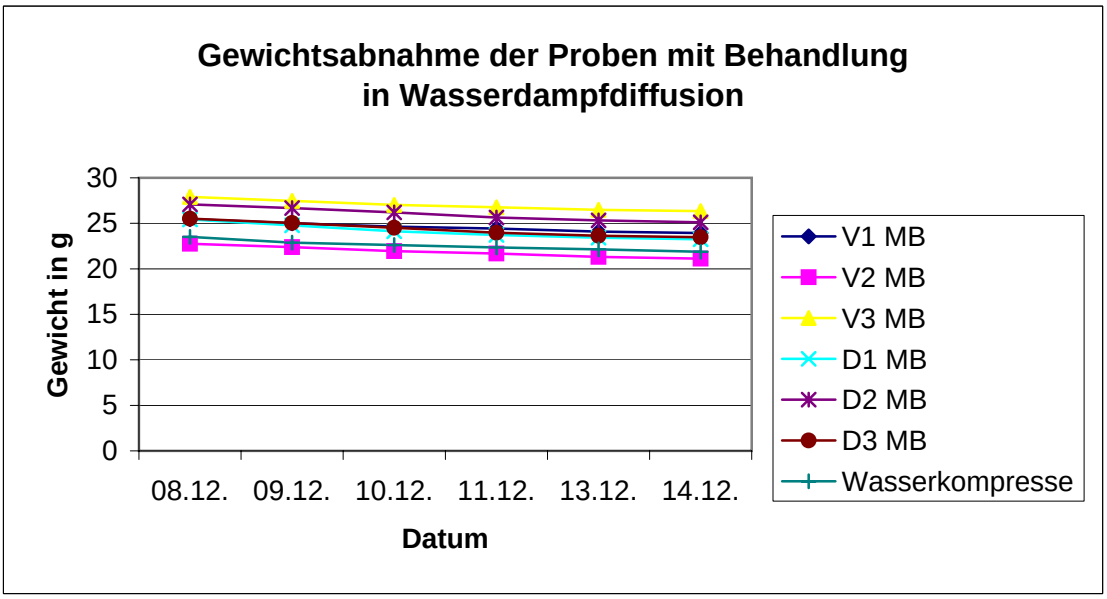
	Probenbezeichnung	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	Ø
1	V1 OB	20,5002	22,4146	20,8223	9,2472	23,0833	**19,2135**
2	V2 OB	18,9556	24,3098	22,6947	24,7846	25,7875	**23,3065**
3	V3 OB	27,4009	24,2777	22,2769	24,0708	24,9186	**24,5890**
4	D1 OB	29,7191	25,9137	24,5533	26,4487	27,2212	**26,7712**
5	D2 OB	35,2665	30,6825	28,6573	30,2177	30,9830	**31,1614**
6	D3 OB	23,2599	15,4404	18,8743	20,5002	21,0422	**19,8234**
7	Nullprobe	36,4311	22,7089	23,7896	25,7517	23,4240	**26,4211**
			Ø 1-6	**24,1442**			

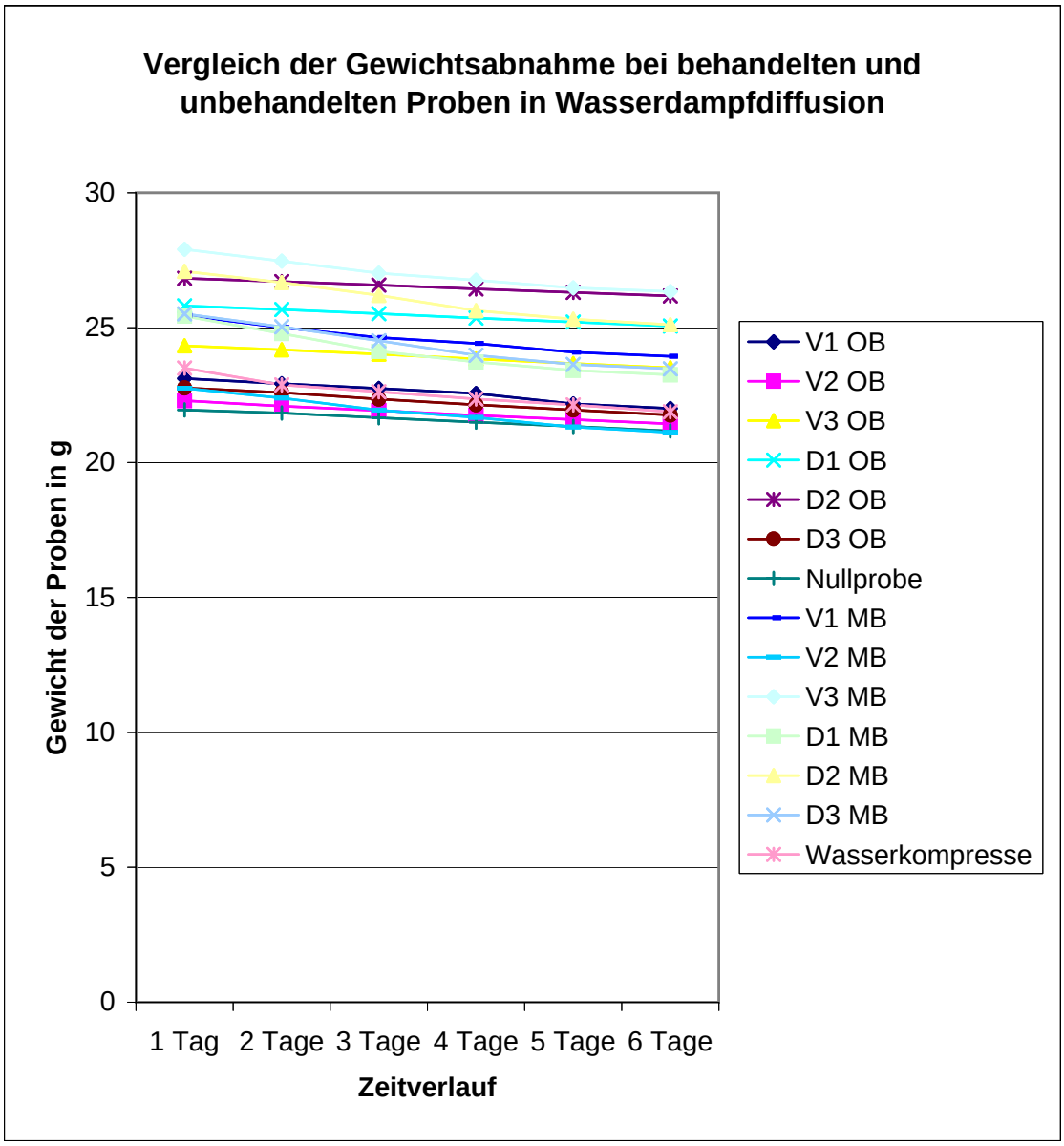
behandelte Oberflächen

	Probenbezeichnung	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	Ø
1	V1 MB	8,9310	11,3185	19,0383	12,7685	27,6326	**15,9378**
2	V2 MB	11,3023	9,0545	15,5968	11,5265	21,4048	**13,7770**
3	V3 MB	9,3182	9,2250	15,9035	14,7960	30,6453	**15,9776**
4	D1 MB	6,2014	5,9639	10,5338	13,2561	26,0533	**12,4017**
5	D2 MB	9,9778	8,5237	7,1074	12,9762	20,6513	**11,8473**
6	D3 MB	8,5256	7,7695	7,5124	12,3028	25,6659	**12,3552**
7	Wasserkompresse	6,4201	16,1962	15,7918	18,8104	16,6417	**14,7720**
			Ø 1-6	**13,7161**			

Probenbezeichnung	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage
V1 OB	23,1183	22,9270	22,7507	22,5621	22,1794	22,0078
V2 OB	22,2961	22,0907	21,9271	21,7528	21,5921	21,4372
V3 OB	24,3280	24,1816	24,0178	23,8405	23,6754	23,5155
D1 OB	25,8091	25,6734	25,5192	25,3571	25,2058	25,0585
D2 OB	26,8261	26,7106	26,5789	26,4385	26,3049	26,1744
D3 OB	22,7675	22,5971	22,3503	22,1441	21,9528	21,7660
Nullprobe	21,9480	21,8360	21,6618	21,4949	21,3398	21,1705
V1 MB	25,4582	25,0018	24,6376	24,4173	24,0929	23,9399
V2 MB	22,7576	22,3929	21,9424	21,6750	21,3171	21,1206
V3 MB	27,9039	27,4655	27,0229	26,7605	26,4791	26,3409
D1 MB	25,4273	24,7850	24,1191	23,7290	23,4161	23,254
D2 MB	27,0869	26,6761	26,1991	25,6333	25,3139	25,1104
D3 MB	25,5113	25,0344	24,5139	23,9767	23,6405	23,476
Wasserkompresse	23,5024	22,8804	22,6226	22,3584	22,1355	21,8844


Gewichtsabnahme der Proben ohne Behandlung
in Wasserdampfdiffusion
Gewicht in g
30
25
20
15
10
5
0
30.11.
01.12.
02.12.
03.12.
04.12.
05.12.
Datum
V1 OB
V2 OB
V3 OB
D1 OB
D2 OB
D3 OB
Nullprobe


Gewichtsabnahme der Proben mit Behandlung
in Wasserdampfdiffusion
Gewicht in g
30
25
20
15
10
5
0
08.12.
09.12.
10.12.
11.12.
13.12.
14.12.
Datum
V1 MB
V2 MB
V3 MB
D1 MB
D2 MB
D3 MB
Wasserkompresse


Vergleich der Gewichtsabnahme bei behandelten und unbehandelten Proben in Wasserdampfdiffusion
Gewicht der Proben in g
30
25
20
15
10
5
0
1 Tag
2 Tage
3 Tage
4 Tage
5 Tage
6 Tage
Zeitverlauf
V1 OB
V2 OB
V3 OB
D1 OB
D2 OB
D3 OB
Nullprobe
V1 MB
V2 MB
V3 MB
D1 MB
D2 MB
D3 MB
Wasserkompresse

Wasserdampfdiffusion der mit Carbopol behandelten Steinplättchen

Gewicht der Probenbehältnisse in g

Probenname	10.11.	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
OB1	293,743	293,116	292,587	291,964	291,340	290,863	290,341	289,545	289,107	288,456	287,895
OB2	298,968	298,309	297,778	297,471	296,523	296,050	295,530	294,737	294,305	293,658	293,100
OB3	288,666	288,060	287,526	286,835	286,144	285,667	285,128	284,325	283,896	283,230	282,664
V1	294,606	294,222	293,913	293,596	293,279	293,029	292,737	292,302	292,075	291,734	291,436
V2	299,089	298,810	298,522	298,204	297,885	297,627	297,333	296,895	296,662	296,319	296,016
V3	299,231	298,981	298,685	298,354	298,022	297,757	297,461	297,007	296,776	296,425	296,114
V4	302,698	302,183	301,844	301,513	301,181	300,919	300,616	300,169	299,932	299,580	299,272
V5	298,472	298,032	297,718	297,280	296,842	296,570	296,282	295,845	295,615	295,270	294,972
V6	293,084	292,781	292,481	292,162	291,843	291,595	291,309	290,880	290,654	290,316	290,017
V7	303,604	303,267	302,927	302,590	302,253	301,977	301,663	301,198	300,949	300,574	300,251
V8	303,362	302,900	302,515	302,153	301,791	301,459	301,138	300,652	300,387	299,992	299,660
V9	298,296	297,724	297,356	296,998	296,640	296,373	296,065	295,593	295,355	294,991	294,671
D1	297,157	296,749	296,571	296,305	296,038	295,811	295,540	295,120	294,907	294,575	294,282
D2	298,874	298,625	298,400	298,111	297,821	297,576	297,276	296,864	296,625	296,285	295,979
D3	294,456	294,096	293,827	293,540	293,252	292,995	292,714	292,302	292,075	291,751	291,456
D4	297,942	297,742	297,545	297,270	296,995	296,769	296,510	296,131	295,903	295,577	295,305
D5	298,658	298,385	298,188	297,909	297,630	297,400	297,122	296,742	296,517	296,187	295,916
D6	296,632	296,424	296,196	295,874	295,551	295,307	295,023	294,623	294,382	294,024	293,727
D7	297,788	297,402	297,066	296,705	296,343	296,083	295,804	295,408	295,175	294,838	294,556
D8	299,509	298,806	298,297	297,851	297,405	297,106	296,786	296,362	296,140	295,817	295,516
D9	293,375	292,722	292,230	291,830	291,429	291,148	290,826	290,370	290,139	289,789	289,468

Gewichtsabnahme in g

Probenname	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
OB1	0,627	0,529	0,624	0,623	0,477	0,522	0,796	0,438	0,651	0,561
OB2	0,659	0,531	0,308	0,947	0,473	0,520	0,793	0,432	0,647	0,558
OB3	0,606	0,534	0,691	0,691	0,477	0,539	0,803	0,429	0,666	0,566
V1	0,384	0,309	0,317	0,317	0,250	0,292	0,435	0,227	0,341	0,298
V2	0,279	0,288	0,319	0,318	0,258	0,294	0,438	0,233	0,343	0,303
V3	0,250	0,296	0,332	0,332	0,265	0,296	0,454	0,231	0,351	0,311
V4	0,515	0,339	0,332	0,332	0,262	0,303	0,447	0,237	0,352	0,308
V5	0,440	0,314	0,438	0,438	0,272	0,288	0,437	0,230	0,345	0,298
V6	0,303	0,300	0,319	0,319	0,248	0,286	0,429	0,226	0,338	0,299
V7	0,337	0,340	0,337	0,337	0,276	0,314	0,465	0,249	0,375	0,323
V8	0,462	0,385	0,362	0,362	0,332	0,321	0,486	0,265	0,395	0,332
V9	0,572	0,368	0,358	0,358	0,267	0,308	0,472	0,238	0,364	0,320
D1	0,408	0,178	0,267	0,267	0,227	0,271	0,420	0,213	0,332	0,293
D2	0,249	0,225	0,289	0,289	0,245	0,300	0,412	0,239	0,340	0,306
D3	0,360	0,269	0,288	0,287	0,257	0,281	0,412	0,227	0,324	0,295
D4	0,200	0,197	0,275	0,275	0,226	0,259	0,379	0,228	0,326	0,272
D5	0,273	0,197	0,279	0,279	0,230	0,278	0,380	0,225	0,330	0,271
D6	0,208	0,228	0,322	0,323	0,244	0,284	0,400	0,241	0,358	0,297
D7	0,386	0,336	0,361	0,361	0,260	0,279	0,396	0,233	0,337	0,282
D8	0,703	0,509	0,446	0,446	0,299	0,320	0,424	0,222	0,323	0,301
D9	0,653	0,492	0,401	0,401	0,281	0,322	0,456	0,231	0,350	0,321

Berechnung der Diffusionswiderstandszahl μ

gemäß der Formel:

$$\mu = \frac{\delta_l \cdot p_s \cdot \Delta a \cdot A \cdot t}{s \cdot \Delta m} \quad \frac{s_l}{s}$$

δL= $1{,}93 * 10^{-10}$

ps= $2{,}065 * 10^{3}$

Δa= 1 (100% innen, 0% aussen)

A= $4{,}2 * 10^{-3}$

t= 24 h = 86400 sec = $86{,}4 * 10^{3}$

Δm= variabel, der Tabelle zu entnehmen

sL= 3,1

s= $10 * 10^{-3}$

Ermittlung der μ- Durchschnittswerte für die unterschiedlichen Behandlungen

Behandlung mit Japanpapier ohne Nachbehandlung

	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage	7 Tage	8 Tage	9 Tage	10 Tage	
V1	373,53	464,94	453,13	453,13	575,40	492,19	329,37	634,01	421,02	482,22	
V2	515,27	499,07	450,98	450,98	557,46	488,82	327,09	617,60	418,54	474,21	
V3	575,40	485,49	433,17	433,17	542,65	485,49	315,46	622,98	408,93	461,93	
D1	351,37	809,39	539,58	539,58	634,01	530,57	341,24	675,89	432,51	490,50	
D2	577,72	639,67	496,46	496,46	587,20	478,98	347,93	602,02	422,26	469,53	
D3	398,63	534,54	499,94	499,94	559,64	511,58	347,93	634,01	443,27	487,15	**Ø**
Ø	**465,32**	**572,18**	**478,88**	**478,88**	**576,06**	**497,94**	**334,84**	**631,08**	**424,42**	**477,59**	**493,72**

Behandlung ohne Japanpapier mit Heißdampfreinigung

	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage	7 Tage	8 Tage	9 Tage	10 Tage	
V4	277,72	423,52	433,17	433,17	548,90	474,21	320,44	607,13	407,76	466,46	
V5	325,59	457,49	327,09	327,09	528,61	499,07	327,85	625,70	416,10	482,22	
V6	474,21	478,98	450,27	450,27	580,06	502,58	334,02	636,83	424,78	480,59	
D4	720,02	731,03	522,81	522,81	636,83	555,29	378,49	631,22	440,53	528,61	
D5	526,66	731,03	515,27	515,27	625,70	517,13	377,49	639,67	435,15	530,57	
D6	692,21	631,22	445,35	445,35	589,62	506,14	358,46	597,00	400,88	483,85	**Ø**
Ø	**502,73**	**575,54**	**448,99**	**448,99**	**584,95**	**509,07**	**349,46**	**622,92**	**420,87**	**495,38**	**495,89**

Behandlung ohne Japanpapier ohne Nachbehandlung

	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage	7 Tage	8 Tage	9 Tage	10 Tage	
V7	426,05	422,26	426,05	426,05	520,90	457,49	307,92	577,72	382,56	444,65	
V8	309,94	372,55	396,41	396,41	432,51	447,44	294,48	542,65	363,04	432,51	
V9	249,74	389,90	400,88	400,88	538,56	466,46	303,31	604,56	394,22	448,85	
D7	371,57	427,33	396,97	396,97	553,15	515,27	362,11	617,60	426,05	509,75	
D8	202,62	281,03	321,17	321,17	480,59	448,85	337,99	648,36	444,65	477,38	
D9	218,38	290,85	358,01	358,01	511,58	446,04	314,06	622,98	410,11	447,44	**Ø**
Ø	**296,38**	**363,99**	**383,25**	**383,25**	**506,22**	**463,59**	**319,98**	**602,31**	**403,44**	**460,10**	**418,25**

Probeplatten ohne Behandlung

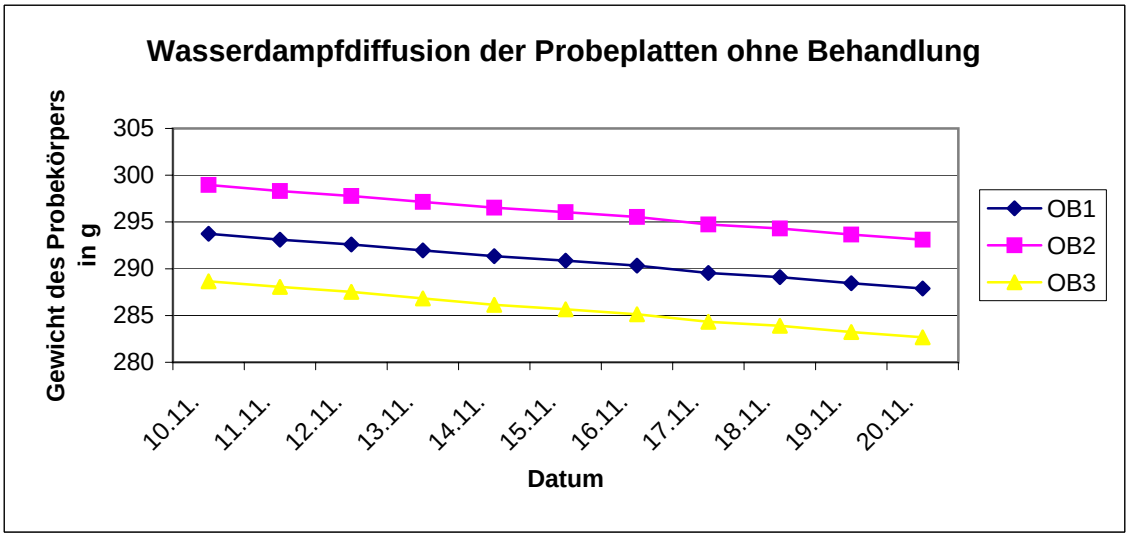
	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage	7 Tage	8 Tage	9 Tage	10 Tage	
OB1	227,56	270,29	228,86	228,86	300,09	273,96	178,59	327,09	219,06	254,70	
OB2	216,36	269,26	467,22	149,54	302,66	275,02	179,28	331,68	220,43	256,08	
OB3	235,55	267,73	206,20	206,20	300,09	265,22	177,00	334,02	214,05	252,42	**Ø**
Ø	**226,49**	**269,09**	**300,76**	**194,86**	**300,95**	**271,40**	**178,29**	**330,93**	**217,85**	**254,40**	**254,50**

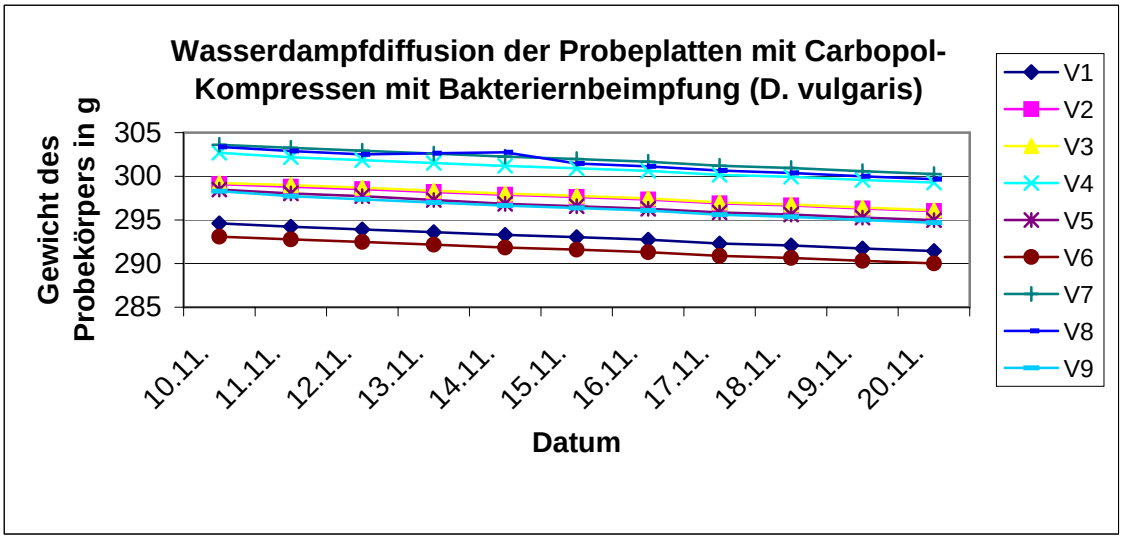
µ- Werte der Wasserdampfdiffusion
an Plättchen mit Bakterienkompresse umgerechnet auf
10 cm²

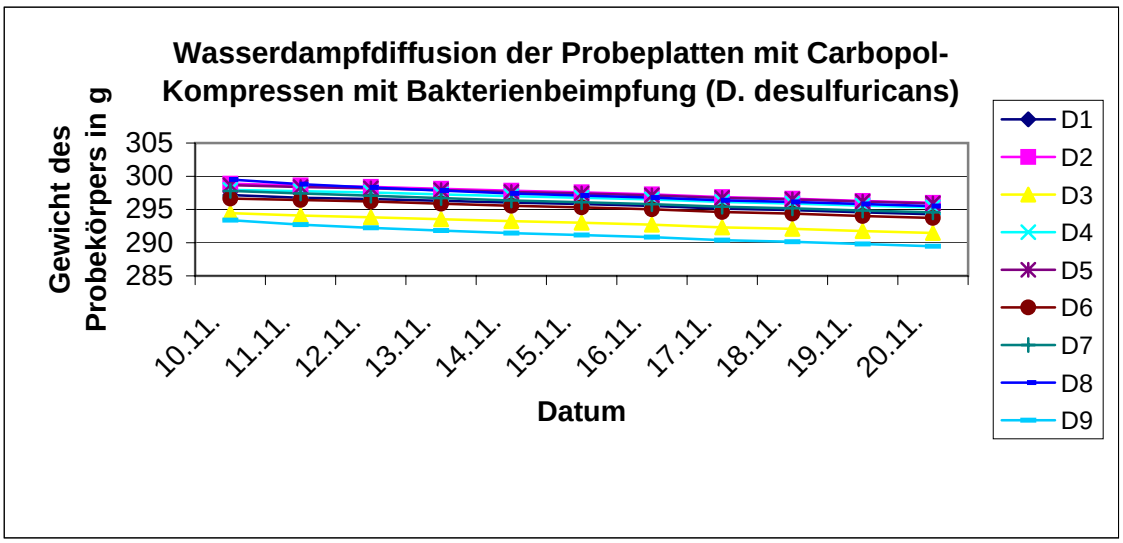
	Ermittelter µ- Wert	µ- Wert auf 10 cm²
Proben ohne Behandlung	**24,14**	**38,63**
Nullprobe	**26,42**	**42,27**
Proben mit Behandlung	**13,72**	**21,95**
Wasserkompresse	**14,77**	**23,63**

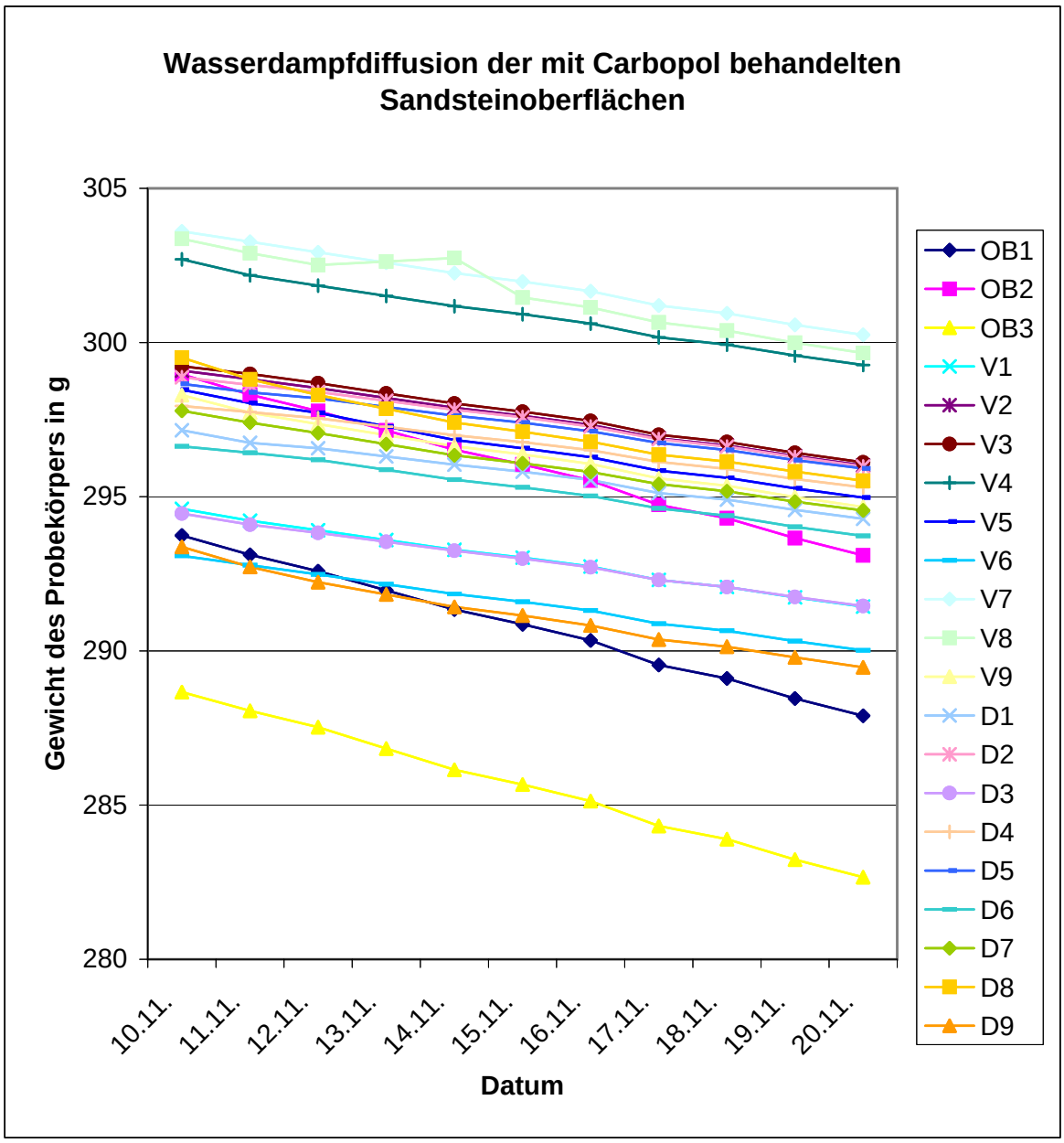
µ- Werte der Wasserdampfdiffusion
an Carbopol- Plättchen umgerechnet auf
10 cm²

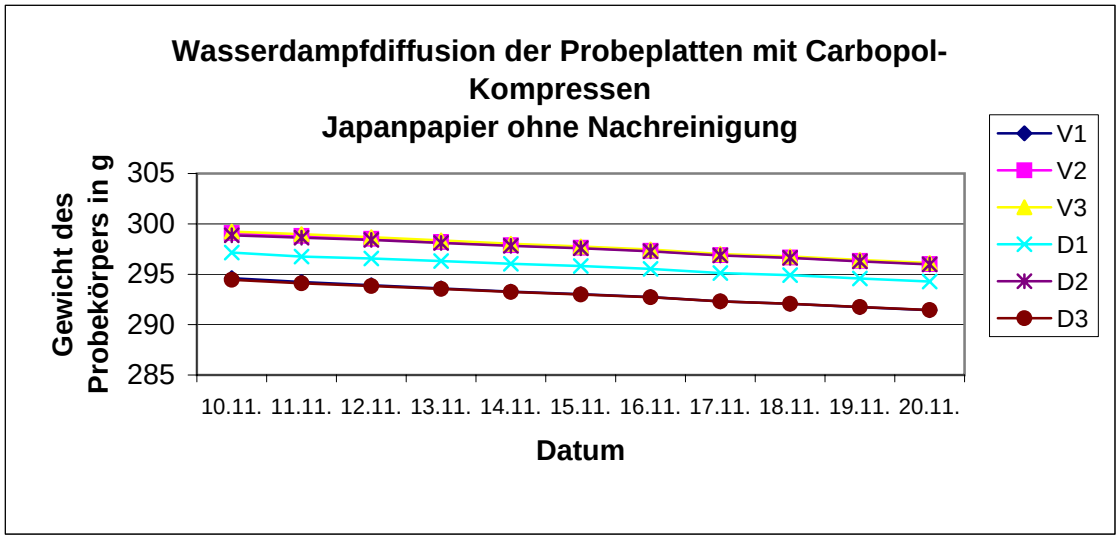
	Ermittelter µ- Wert	µ- Wert auf 10 cm²
mit Japanpapier ohne Nachbehandlung	**493,72**	**117,55**
ohne Japanpapier mit Heissdampf	**495,89**	**118,07**
ohne Japanpapier ohne Nachbehandlung	**418,89**	**99,74**
ohne Behandlung	**254,50**	**60,60**

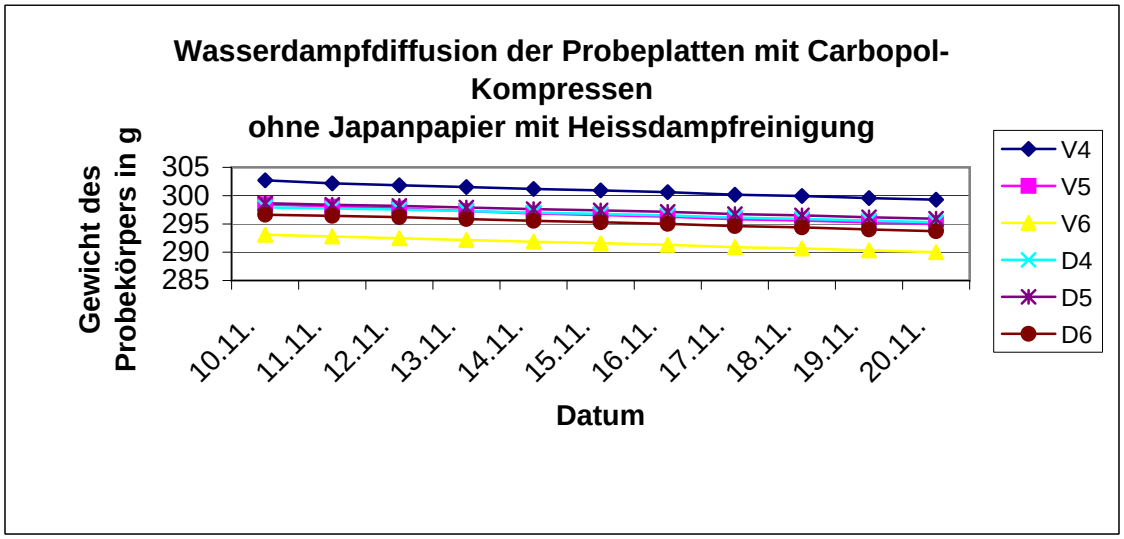

Wasserdampfdiffusion der Probeplatten ohne Behandlung
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
280
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
OB1
OB2
OB3

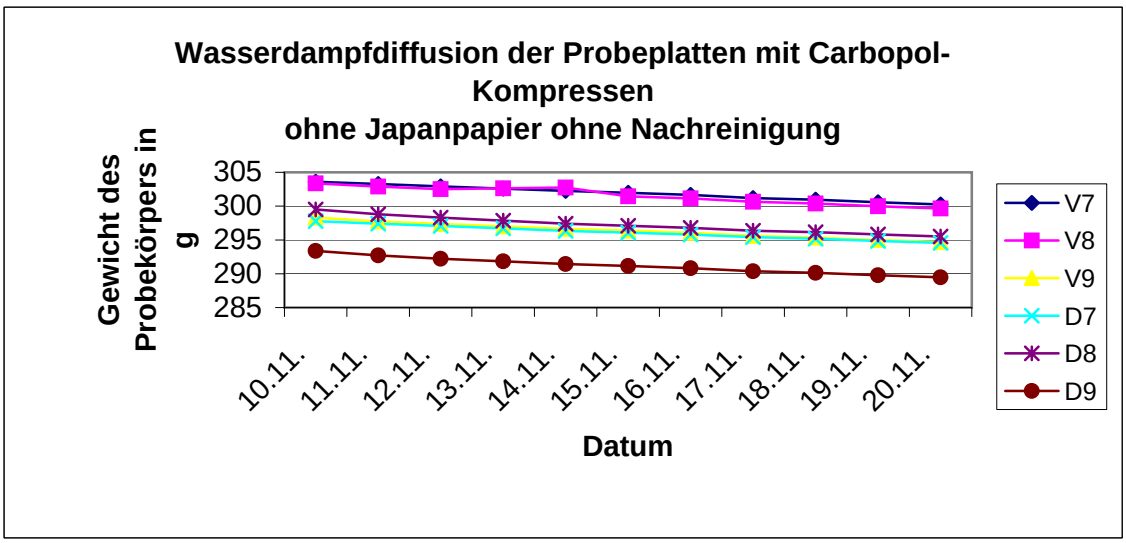

Wasserdampfdiffusion der Probeplatten mit Carbopol-Kompressen mit Bakteriernbeimpfung (D. vulgaris)
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
V1
V2
V3
V4
V5
V6
V7
V8
V9


Wasserdampfdiffusion der Probeplatten mit Carbopol-Kompressen mit Bakterienbeimpfung (D. desulfuricans)
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D7
D8
D9


Wasserdampfdiffusion der mit Carbopol behandelten Sandsteinoberflächen
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
280
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
OB1
OB2
OB3
V1
V2
V3
V4
V5
V6
V7
V8
V9
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D7
D8
D9


Wasserdampfdiffusion der Probeplatten mit Carbopol-Kompressen
Japanpapier ohne Nachreinigung
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
V1
V2
V3
D1
D2
D3


Wasserdampfdiffusion der Probeplatten mit Carbopol-Kompressen
ohne Japanpapier mit Heissdampfreinigung
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
V4
V5
V6
D4
D5
D6


Wasserdampfdiffusion der Probeplatten mit Carbopol-Kompressen
ohne Japanpapier ohne Nachreinigung
Gewicht des Probekörpers in g
305
300
295
290
285
10.11.
11.11.
12.11.
13.11.
14.11.
15.11.
16.11.
17.11.
18.11.
19.11.
20.11.
Datum
V7
V8
V9
D7
D8
D9

Probenname	10.11.	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
V1	294,606	294,222	293,913	293,596	293,279	293,029	292,737	292,302	292,075	291,734	291,436
V2	299,089	298,810	298,522	298,204	297,885	297,627	297,333	296,895	296,662	296,319	296,016
V3	299,231	298,981	298,685	298,354	298,022	297,757	297,461	297,007	296,776	296,425	296,114
D1	297,157	296,749	296,571	296,305	296,038	295,811	295,540	295,120	294,907	294,575	294,282
D2	298,874	298,625	298,400	298,111	297,821	297,576	297,276	296,864	296,625	296,285	295,979
D3	294,456	294,096	293,827	293,540	293,252	292,995	292,714	292,302	292,075	291,751	291,456

Probenname	10.11.	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
V4	302,698	302,183	301,844	301,513	301,181	300,919	300,616	300,169	299,932	299,580	299,272
V5	298,472	298,032	297,718	297,280	296,842	296,570	296,282	295,845	295,615	295,270	294,972
V6	293,084	292,781	292,481	292,162	291,843	291,595	291,309	290,880	290,654	290,316	290,017
D4	297,942	297,742	297,545	297,270	296,995	296,769	296,510	296,131	295,903	295,577	295,305
D5	298,658	298,385	298,188	297,909	297,630	297,400	297,122	296,742	296,517	296,187	295,916
D6	296,632	296,424	296,196	295,874	295,551	295,307	295,023	294,623	294,382	294,024	293,727

Probenname	10.11.	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
V7	303,604	303,267	302,927	302,590	302,253	301,977	301,663	301,198	300,949	300,574	300,251
V8	303,362	302,900	302,515	302,628	302,741	301,459	301,138	300,652	300,387	299,992	299,660
V9	298,296	297,724	297,356	296,998	296,640	296,373	296,065	295,593	295,355	294,991	294,671
D7	297,788	297,402	297,066	296,705	296,343	296,083	295,804	295,408	295,175	294,838	294,556
D8	299,509	298,806	298,297	297,851	297,405	297,106	296,786	296,362	296,140	295,817	295,516
D9	293,375	292,722	292,230	291,830	291,429	291,148	290,826	290,370	290,139	289,789	289,468

OB1	293,743	293,116	292,587	291,964	291,340	290,863	290,341	289,545	289,107	288,456	287,895
OB2	298,968	298,309	297,778	297,151	296,523	296,050	295,530	294,737	294,305	293,658	293,100
OB3	288,666	288,060	287,526	286,835	286,144	285,667	285,128	284,325	283,896	283,230	282,664

Probenname	10.11.	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
D1	297,157	296,749	296,571	296,305	296,038	295,811	295,540	295,120	294,907	294,575	294,282
D2	298,874	298,625	298,400	298,111	297,821	297,576	297,276	296,864	296,625	296,285	295,979
D3	294,456	294,096	293,827	293,540	293,252	292,995	292,714	292,302	292,075	291,751	291,456
D4	297,942	297,742	297,545	297,270	296,995	296,769	296,510	296,131	295,903	295,577	295,305
D5	298,658	298,385	298,188	297,909	297,630	297,400	297,122	296,742	296,517	296,187	295,916
D6	296,632	296,424	296,196	295,874	295,551	295,307	295,023	294,623	294,382	294,024	293,727
D7	297,788	297,402	297,066	296,705	296,343	296,083	295,804	295,408	295,175	294,838	294,556
D8	299,509	298,806	298,297	297,851	297,405	297,106	296,786	296,362	296,140	295,817	295,516
D9	293,375	292,722	292,230	291,830	291,429	291,148	290,826	290,370	290,139	289,789	289,468

Probenname	10.11.	11.11.	12.11.	13.11.	14.11.	15.11.	16.11.	17.11.	18.11.	19.11.	20.11.
V1	294,606	294,222	293,913	293,596	293,279	293,029	292,737	292,302	292,075	291,734	291,436
V2	299,089	298,810	298,522	298,204	297,885	297,627	297,333	296,895	296,662	296,319	296,016
V3	299,231	298,981	298,685	298,354	298,022	297,757	297,461	297,007	296,776	296,425	296,114
V4	302,698	302,183	301,844	301,513	301,181	300,919	300,616	300,169	299,932	299,580	299,272
V5	298,472	298,032	297,718	297,280	296,842	296,570	296,282	295,845	295,615	295,270	294,972
V6	293,084	292,781	292,481	292,162	291,843	291,595	291,309	290,880	290,654	290,316	290,017
V7	303,604	303,267	302,927	302,590	302,253	301,977	301,663	301,198	300,949	300,574	300,251
V8	303,362	302,900	302,515	302,628	302,741	301,459	301,138	300,652	300,387	299,992	299,660
V9	298,296	297,724	297,356	296,998	296,640	296,373	296,065	295,593	295,355	294,991	294,671

Ergebnisse der Photometermessung

Eichkurve

Sulfatgehalt	Ergebnis
reines aqua dest.	0,000
25 mg/ltr	0,050
50 mg/ltr	0,162
100 mg/ltr	0,387
150 mg/ltr	0,688
200 mg/ltr	0,859
250 mg/ltr	1,162
300 mg/ltr	1,339
500 mg/ltr	2,105

Applikation Labor

Probenbezeichnung	Vorzustand	Endzustand 3 Tage	Differenz in %	Endzustand 6 Tage	Differenz in %
L1	0,050	0,010	80,00	0,000	100,000
L2	0,856	1,110	-29,67	1,020	-19,159
L3	0,013	0,001	92,31	0,000	100,000
L4	0,706	0,533	24,50	0,503	28,754
L5	1,526	0,000	100,00	0,000	100,000
L6	1,162	0,425	63,43	0,500	56,971
L7	0,048	0,023	52,08	0,000	100,000
L8	0,032	0,017	46,88	0,000	100,000
L9	0,230	0,202	12,17	0,182	20,870
L10	0,230	0,207	10,00	./.	./.

Applikation Polen

Probenbezeichnung	Vorzustand	Endzustand	Differenz in %
P1	0,109	0,090	17,43
P2	0,160	0,045	71,88
P3	0,057	0,015	73,68
P10	0,140	0,001	99,29
P13	0,125	0,000	100,00

Applikation Dom

Probenbezeichnung	Vorzustand	Endzustand	Differenz in %
D1	1,546	0,697	54,92
D2	1,121	0,823	26,58
D3	1,542	1,083	29,77
D4	1,667	1,146	31,25
D5	0,968	1,306	-34,92
D6	1,046	0,491	53,06
D7	1,049	1,016	3,15
D8	0,963	0,272	71,75
D9	1,066	0,644	39,59

Extinktion **Abgleich gegen die Eichkurve**

Applikation Labor **Angaben in mg/ltr**

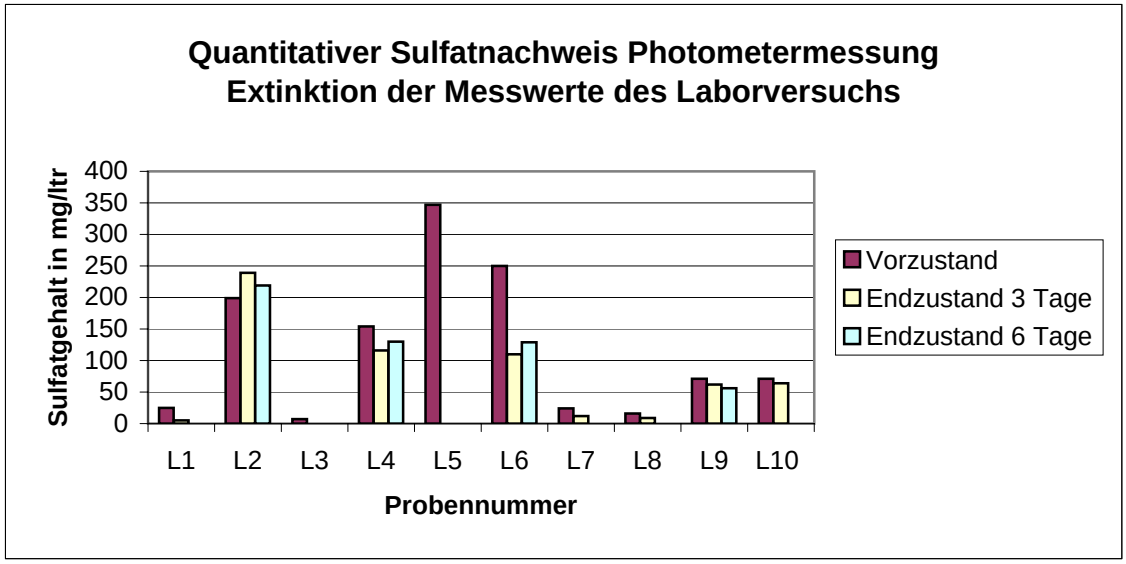
		Endzustand	Endzustand
Probennummer	**Vorzustand**	**3 Tage**	**6 Tage**
L1	25	5	0
L2	199	239	219
L3	7	0	0
L4	154	116	130
L5	347	0	0
L6	250	110	129
L7	24	12	0
L8	16	9	0
L9	71	62	56
L10	71	64	./.

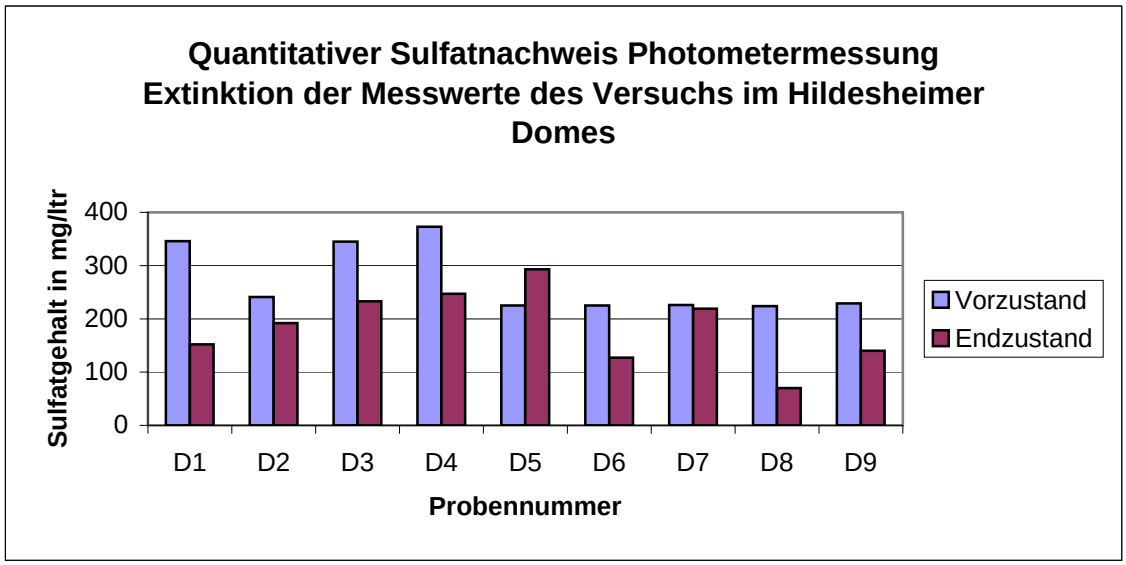
Applikation Polen

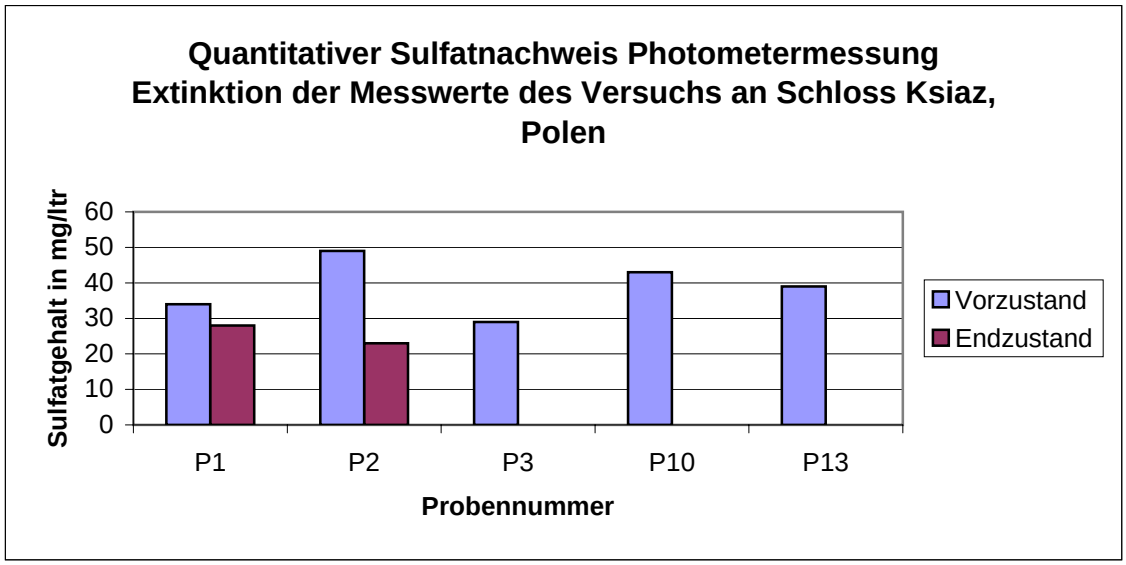
Probennummer	Vorzustand	Endzustand
P1	34	28
P2	49	23
P3	29	0
P10	43	0
P13	39	0

Applikation Dom

Probennummer	Vorzustand	Endzustand
D1	346	152
D2	241	192
D3	345	233
D4	373	247
D5	225	293
D6	225	127
D7	226	219
D8	224	70
D9	229	140

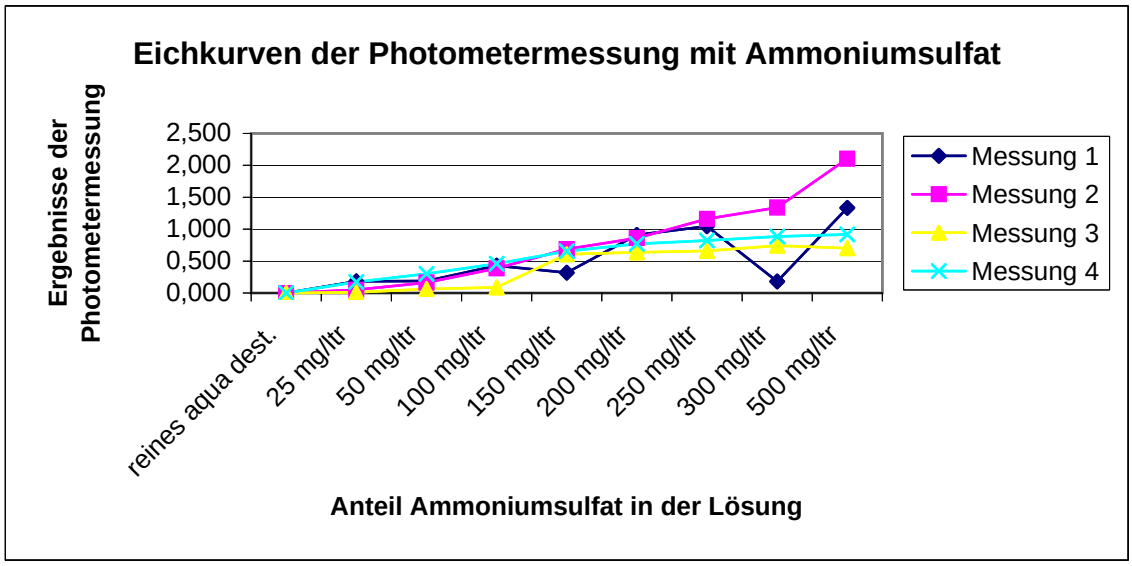

Quantitativer Sulfatnachweis Photometermessung
Extinktion der Messwerte des Laborversuchs
Sulfatgehalt in mg/ltr
400
350
300
250
200
150
100
50
0
L1
L2
L3
L4
L5
L6
L7
L8
L9
L10
Probennummer
Vorzustand
Endzustand 3 Tage
Endzustand 6 Tage

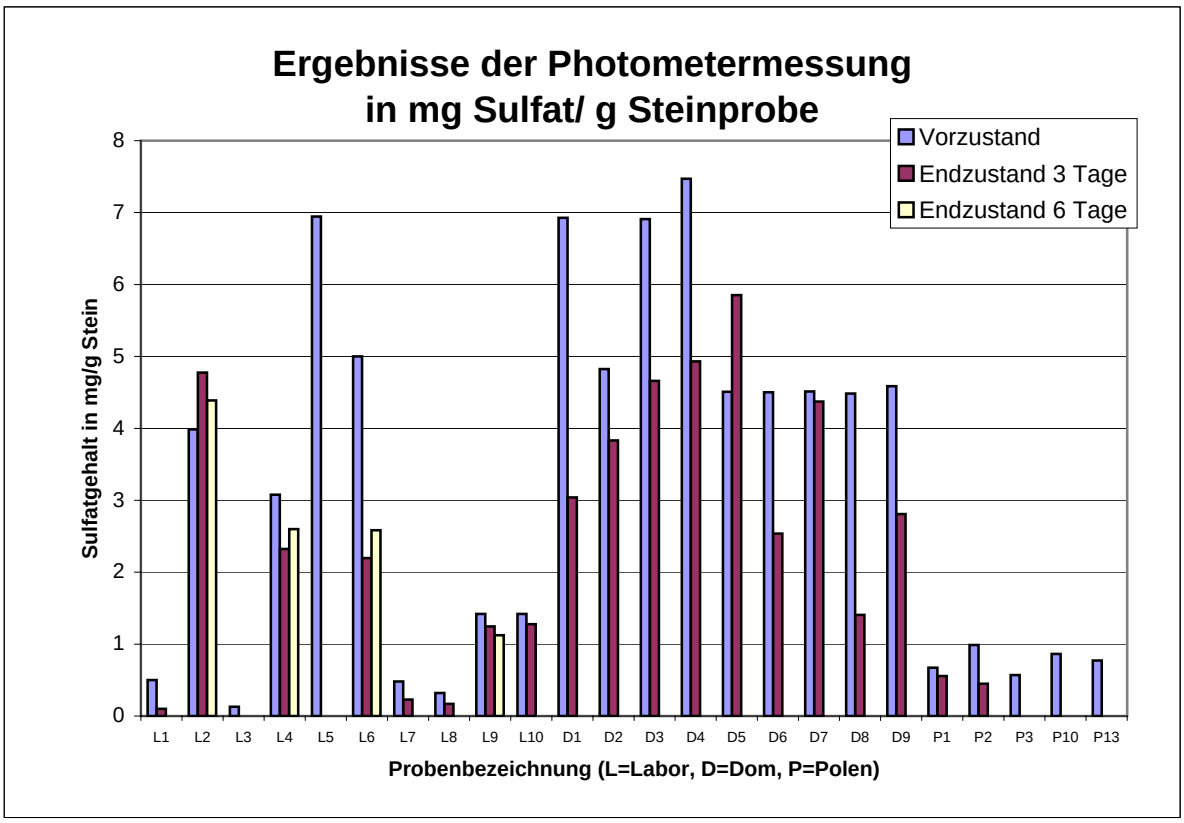

Quantitativer Sulfatnachweis Photometermessung
Extinktion der Messwerte des Versuchs im Hildesheimer Domes
Sulfatgehalt in mg/ltr
400
300
200
100
0
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D7
D8
D9
Probennummer
Vorzustand
Endzustand

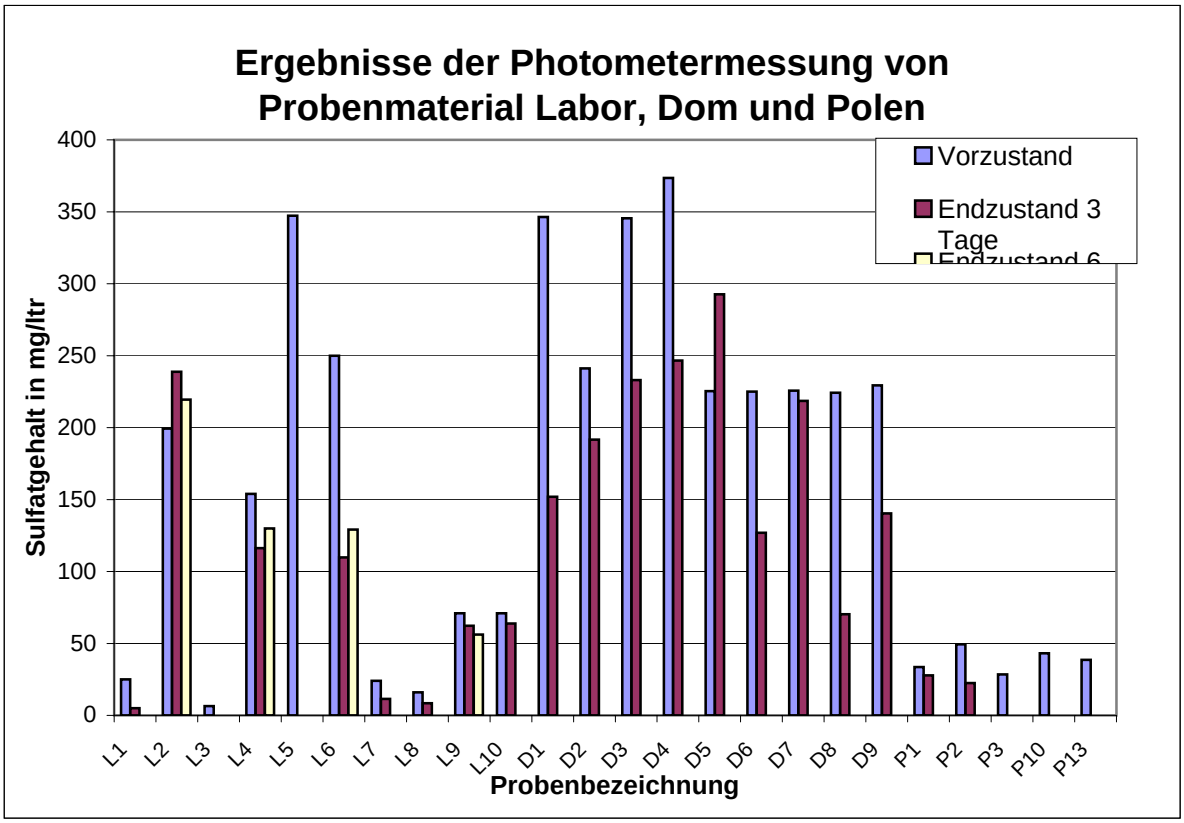

Quantitativer Sulfatnachweis Photometermessung
Extinktion der Messwerte des Versuchs an Schloss Ksiaz, Polen
Sulfatgehalt in mg/ltr
60
50
40
30
20
10
0
P1
P2
P3
P10
P13
Probennummer
Vorzustand
Endzustand

Eichkurven: verwendet wurde im Folgenden Messung 2

Sulfatgehalt	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4
reines aqua dest.	0,000	0,000	0,000	0,000
25 mg/ltr	0,184	0,050	0,011	0,173
50 mg/ltr	0,188	0,162	0,062	0,302
100 mg/ltr	0,428	0,387	0,088	0,458
150 mg/ltr	0,319	0,688	0,606	0,654
200 mg/ltr	0,909	0,859	0,636	0,769
250 mg/ltr	1,045	1,162	0,659	0,823
300 mg/ltr	0,180	1,339	0,743	0,884
500 mg/ltr	1,333	2,105	0,701	0,917




Ergebnisse der Photometermessung
in mg Sulfat/ g Steinprobe
Vorzustand
Endzustand 3 Tage
Endzustand 6 Tage
Sulfatgehalt in mg/g Stein
0
1
2
3
4
5
6
7
8
L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7 L8 L9 L10 D1 D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9 P1 P2 P3 P10 P13
Probenbezeichnung (L=Labor, D=Dom, P=Polen)


Ergebnisse der Photometermessung von
Probenmaterial Labor, Dom und Polen
Vorzustand
Endzustand 3 Tage
Sulfatgehalt in mg/ltr
0
50
100
150
200
250
300
350
400
L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7 L8 L9 L10 D1 D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9 P1 P2 P3 P10 P13
Probenbezeichnung

Umrechnung der Ergebnisse der Photometermessungen in Sulfatgehalt mg/ltr

Sulfatgehalt	Eichreihe
reines aqua dest.	0,000
25 mg/ltr	0,050
50 mg/ltr	0,162
100 mg/ltr	0,387
150 mg/ltr	0,688
200 mg/ltr	0,859
250 mg/ltr	1,162
300 mg/ltr	1,339
500 mg/ltr	2,105

Applikation Labor

Probenbezeichnung	Vorzustand	mg/ltr	Endzustand 3 Tage	mg/ltr	Differenz in %	Endzustand 6 Tage	mg/ltr	Differenz in %
L1	0,050	25	0,010	5	80,00	0,000	0	100,000
L2	0,856	199	1,110	239	-29,67	1,020	219	-19,159
L3	0,013	7	0,001	0	92,31	0,000	0	100,000
L4	0,706	154	0,533	116	24,50	0,503	130	28,754
L5	1,550	347	0,000	0	100,00	0,000	0	100,000
L6	1,162	250	0,425	110	63,43	0,500	129	56,971
L7	0,048	24	0,023	12	52,08	0,000	0	100,000
L8	0,032	16	0,017	9	46,88	0,000	0	100,000
L9	0,230	71	0,202	62	12,17	0,182	56	20,870
L10	0,230	71	0,207	64	10,00	./.	./.	./.

Applikation Dom

Probenbezeichnung	Vorzustand	mg/ltr	Endzustand	mg/ltr	Differenz in %
D1	1,546	346	0,697	152	54,92
D2	1,121	241	0,823	192	26,58
D3	1,542	345	1,083	233	29,77
D4	1,667	373	1,146	247	31,25
D5	0,968	225	1,306	293	-34,92
D6	1,046	225	0,491	127	53,06
D7	1,049	226	1,016	219	3,15
D8	0,963	224	0,272	70	71,75
D9	1,066	229	0,644	140	39,59

Applikation Polen

Probenbezeichnung	Vorzustand	mg/ltr	Endzustand	mg/ltr	Differenz in %
P1	0,109	34	0,090	28	17,43
P2	0,160	49	0,045	23	71,88
P3	0,057	29	0,015	0	73,68
P10	0,140	43	0,001	0	99,29
P13	0,125	39	0,000	0	100,00

Zusammengefasste Ergebnisse der Messungen in mg Sulfat/g Stein

Probenbezeichnung	Vorzustand	Endzustand 3 Tage	Endzustand 6 Tage
L1	0,50	0,10	0,00
L2	3,99	4,78	4,39
L3	0,13	0,00	0,00
L4	3,08	2,32	2,60
L5	6,95	0,00	0,00
L6	5,00	2,20	2,58
L7	0,48	0,23	0,00
L8	0,32	0,17	0,00
L9	1,42	1,25	1,12
L10	1,42	1,28	./.
D1	6,93	3,04	
D2	4,82	3,83	
D3	6,91	4,66	
D4	7,47	4,93	
D5	4,51	5,85	
D6	4,50	2,54	
D7	4,51	4,37	
D8	4,48	1,41	
D9	4,59	2,81	
P1	0,67	0,56	
P2	0,99	0,45	
P3	0,57	0,00	
P10	0,86	0,00	
P13	0,77	0,00	

Zusammengefasste Ergebnisse der Messungen in mg/ltr

Probenbezeichnung	Vorzustand	Endzustand 3 Tage	Endzustand 6 Tage
L1	25	5	0
L2	199	239	219
L3	7	0	0
L4	154	116	130
L5	347	0	0
L6	250	110	129
L7	24	12	0
L8	16	9	0
L9	71	62	56
L10	71	64	./.
D1	346	152	
D2	241	192	
D3	345	233	
D4	373	247	
D5	225	293	
D6	225	127	
D7	226	219	
D8	224	70	
D9	229	140	
P1	34	28	
P2	49	23	
P3	29	0	
P10	43	0	
P13	39	0	

Abbildungsverzeichnis

Nr.	Beschreibung	Quelle	Seite
1	Prozesse der Natursteinverwitterung	Müller 2000, S. 6	8
2	Zone der Auskristallisation von bauschädlichen Salzen	Zehnder 2003, S. 16	9
3	Deposition auf Gesteinsoberflächen	Müller 2000, S. 12	12
4	Verschiedene Krustentypen	Neumann 1994, S. 54	14
5	Gipskrusten auf Sandstein	Klemm 2005, S. 47	15
6	REM- Aufnahme Gipskristalle	Uni Oldenburg	16
7	Reaktionen Kruste Sandstein	Müller 2000, S. 120	18
8	Anaerobenkammer im Labor	M. Scheer	32
9	Bakterienfluoreszenz	M. Scheer	37
10	Zunahme der Zelldichte	M. Scheer	39
11	Zunahme der Zelldichte	M. Scheer	39
12	Zunahme der Zelldichte	M. Scheer	39
13	Gramfärbung	M. Scheer	42
14	Gramfärbung	M. Scheer	42
15	KOH- Test	M. Scheer	43
16	Zentrifuge	M. Scheer	46
17	Thomakammer	M. Scheer	48
18	Glasfiltrationsgerät	Benutzerhandbuch	52
19	Gipswürfel	M. Scheer	58
20	Gipswürfel	M. Scheer	58
21	REM- Aufnahmen Gips	M. Scheer	60
22	REM- Aufnahmen Gips	M. Scheer	60
23	Kompressenmaterialien	M. Scheer	67
24	Kompressenmaterialien	M. Scheer	67
25	Tropfentest	M. Scheer	69
26	Tropfentest	M. Scheer	69
27	Foliensysteme	M. Scheer	78
28	Probenmaterial aus Dresden	M. Scheer	80
29	Probenmaterial aus Dresden	M. Scheer	80
30	Schloss Fürstenstein, Polen	M. Scheer	85
31	Probeflächen 1-14	M. Scheer	87
32	Probeflächen 15-18	M. Scheer	87
33	Probeflächen 19-21	M. Scheer	87
34	Probeflächen 22+23	M. Scheer	87
35	Hildesheimer Dom	M. Scheer	93
36	Testflächen	M. Scheer	94
37	Beimpfte Folien unter UV- Licht	M. Scheer	99
38	Beimpfte Folien unter UV- Licht	M. Scheer	99
39	Carbopolkompressen UV- Licht	M. Scheer	100
40	Carbopolkompressen UV- Licht	M. Scheer	100
41	Bakterien auf Probenmaterial	M. Scheer	101
42	Gips im REM	M. Scheer	102
43	Gips im REM	M. Scheer	102
44	Oberflächen mit AMC im REM	M. Scheer	103
45	Oberflächen Carbopol im REM	M. Scheer	103
46	Mirowskimessung Dom	M. Scheer	105

Nr.	Beschreibung	Quelle	Seite
47	Mirowskimessung Dom	M. Scheer	105
48	Mirowskimessung aqua dest.	M. Scheer	107
49	Mirowskimessung aqua dest.	M. Scheer	107
50	Mirowskimessung Schellsol D 40	M. Scheer	109
51	Mirowskimessung Schellsol D 40	M. Scheer	109
52	Wasserdampfdiffusion im Labor	M. Scheer	112
53	Anfärbung nach Matteini	M. Scheer	118
54	Anfärbung nach Matteini	M. Scheer	118
55	Anfärbung nach Matteini	M. Scheer	118
56	Anfärbung nach Matteini	M. Scheer	118
57	Anfärbung nach Matteini	M. Scheer	118
58	Photometermessung	M. Scheer	120
59	Photometermessung Ergebnisse	M. Scheer	121

Verwendete Materialien und Bezugsquellen

Für die Kompressen:
Carbopol 954, Nr. 63811, Kremer Pigmente
Laponite RD, Nr. 58935, Kremer Pigmente
Sepiolith (Meerschaumpulver), Nr. 58945, Kremer Pigmente
Attapulgit, Nr. 99940, Kremer Pigmente
Bentonit, Nr. 0113.1 Roth GmbH
Foliensysteme des Projektes “Biokompresse”

Für die Zubereitung des Mediums und des Puffers
Kaliumdihydrogenphosphat, Nr. P749.1, Roth GmbH
Ammoniumchlorid, Nr. P726.1, Roth GmbH
Natriumsulfat, Nr. 8631.1, Roth GmbH
Calciumchlorid, Nr. 5239.2, Roth GmbH
MagnesiumsulfatNr. 21.311.68, Janssen Chimica
Hefeextrakt, Nr. 2363.1, Roth GmbH
Resazurin, Cat.Nr. 19,930-3, Aldrich
Eisensulfat, Nr. 3722.1, Roth GmbH
Natriumthioglycolat, Nr. T 0632, Sigma
Ascorbinsäure, Nr. 3525, Roth GmbH
Natriumlactat, Nr. L1375, Sigma
Dikaliumhydrogenphosphat, Nr. P018.1, Roth GmbH

Bakterien
Desulfovibrio vulgaris subsp. vulgaris, Nr. 644, DSMZ Braunschweig
Desulfovibrio desulfuricans subsp. desulfuricans, Nr. 642, DSMZ Braunschweig

Für weitere Nachweise
Life / Dead Baclight Bacterial Viability Kit for microscopy, Molecular Probes, Niederlande
Kristallviolett (pH 7,5, 0,5%ig), Verdünnung selbst hergestellt
Jod- Kaliumjodidlösung nach Lugol, Nr. 052.1 Roth
Safranin (0,5%ig), Verdünnung selbst hergestellt
Ethanol (96%ig), Nr. T 171.4, Roth GmbH

Verwendete Gerätschaften
Ohaus Explorer Feinwaage
Vortec- Genie 2, Shaker
Heidolph MR 3001 Heizplatte mit integrierter Rührfunktion
pH- Fix 0-14, farbfixierte Indikatorstäbchen, Roth GmbH
Edelstahlkanülen 1,00 x 300 mm LL, Art.- Nr. 529/10, HERO, Robert Helwig GmbH
Tuttnauer Systec 2540 ELV Autoklav, Systec GmbH
Terostat IX Abdichtungsmasse für die Anaerobenkammer, Henkel- Teroson GmbH
Hettich Zentrifuge EBA 12
Vakuumfiltrationsgerät, Nr. 16306 / 16307, Sartorius AG
Zellulose- Nitrat- Filter, Porendurchmesser 0,45 µm, Sartorius AG
Zellulose- Nitrat- Filter, Porendurchmesser 8 µm, Sartorius AG
Quantofix Teststäbchen, halbquanitativer Sulfatnachweis
Vollquantitativer Sulfatnachweis Spectroquant, Nr. 1.14791.0001, Fa. Merck
Spektralphotometer Spectronic Genesys 2
Steinsäge W. Rominger, mechanische Werkstätte Bitz
Nasssäge Steinadler, A. Ritzl GmbH Nersingen
Thomakammer Superior, Marienfeld Germany